



GreenSpace

Satellite-based Green Spaces mapping for Greening and Healthy Cities

Réf. : DAR/OAR/SOA-2023-17284

Version : v1.1

Date : 10/12/2025

Réf. Contrat : CNES-044_2150

Signatures

	Nom	Société	Signature
Préparé par	Pierre Sicard	ACRI-ST	
Approuvé par	Christophe Lerebourg	ACRI-ST	

Liste de Diffusion

Société	Pour
ACRI-ST	Les services concernées
CNES	Les services concernées

Historique des Modifications

Version	Date	Modifications
1.0	28/10/2025	Version initiale

Table des Matières

Acronymes et Abréviations	5
Résumé	6
Partenariat	7
1. Contexte et objectifs	8
2. Méthodologie	12
2.1. Distribution, classification, et cartographie des espaces verts	12
2.1.1. Images satellites	12
2.1.2. Inventaire des arbres	14
2.1.3. Segmentation et processus de classification	14
2.2. Estimation du diamètre du houppier des arbres	21
2.3. Estimation de la hauteur d'arbres	21
2.4. Cartographie et évaluation des services écosystémiques	22
2.4.1. Données qualité de l'air et météorologiques	23
2.4.2. Quantification de la capacité d'élimination des polluants	23
2.6. Mission terrain	27
3. Résultats	29
3.1. Ville pilote: Valencia	29
3.2. Ville pilote: Bucarest	35
3.3. Classement des espèces végétales	40
3.4. Expérience utilisateurs	46
3.4.1. Besoins des Utilisateurs identifiés	46
3.4.2. Retours des Utilisateurs	48
3.4.3. Promotion et diffusion du service	49
4. Bilan vis-à-vis du SCO	51
5. Perspectives et marchés	52
5.1. Perspectives	52
5.2. Marchés adressés	53
6. Démarche environnementale lors de la mise en œuvre du projet	55
Conclusions	56
Références bibliographiques	58
Annexe 1	59
Annexe 2	63
Annexe 3	72
Annexe 4	76

Acronymes et Abréviations

ARE	Area of Roughness Elements = surface moyenne du bâti
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CEREMA	Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
COV	Composés Organiques Volatils
GDAL	Geospatial Data Abstraction Library
GLCM	Grey Level Co-occurrence Matrix
ICU	Ilots de Chaleur Urbains
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
LAI	Leaf Area Index
LCZ	Local Climate Zones
LiDAR	Laser Imaging Detection And Ranging
LST	Land Surface Temperature
MNH	Modèle Numérique de Hauteur
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OSM	Open Street Map
OTB	Orfeo Toolbox
PAN	Panchromatique
PCAET	Plan Climat Air Energie Territorial
PIR	Proche InfraRouge
QGIS	Quantum Geographic Information System
RGB/RVB	Red, Green, Blue / Rouge, Vert, Bleu
RF	Random Forest
SCO	Space Climate Observatory
SE	Services Écosystémiques
SIG	Système d'Information Géographique
SWIR	Short-Wave Infrared
THRS	Très Haute Résolution Spatiale
UTFVI	Urban Thermal Field Variance Index
USGS	United States Geological Survey
VNIR	Visible and Near-Infrared
WUDAPT	World Urban Database and Access Portal Tool

Résumé

Pour une urbanisation durable et résiliente, **SCO GreenSpace** propose aux municipalités une cartographie par télédétection spatiale *i.* de leur **patrimoine arboré**, et *ii.* de **ses attributs** tel que la hauteur; ceci permet de compléter les inventaires municipaux qui n'incluent que 20 à 30% dudit patrimoine arboré, alors que le reste est en propriétés privées, inaccessibles où le comptage n'est possible que par télédétection.

Les collectivités territoriales en ont besoin pour satisfaire (a) le Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET), et (b) les réglementations à venir suite à la publication de la stratégie de l'Union Européenne en faveur de la biodiversité (COM(2020)380) qui impose aux villes de plus de 20 000 habitants à produire un « plan de verdissement ambitieux » tandis que le règlement sur la restauration de la nature (2024/1991) impose qu'aucune perte nette d'espaces verts ne soit tolérée d'ici 2030 et une progression mesurable dès 2031.

Les services ci-dessus sont entièrement prototypés sur deux villes en Europe représentatives de contextes climatiques et urbains contrastés, afin d'élargir la transférabilité de la méthodologie en Europe. En utilisant une approche basée sur les satellites avec des images du satellite Pléiades à très haute résolution spatiale et spectrale, nous avons détecté et classé les espèces d'arbres les plus communes à Valencia (146 445 arbres adultes sur 126 km²) et Bucharest (370 866 arbres sur 67 km²) dans les zones privées (jardins résidentiels) et publiques. En 2022, les 284 305 arbres détectés dans le centre-ville de Valencia, et les zones environnantes, ont éliminé environ 197 tonnes de dioxyde d'azote (NO₂), 37 tonnes de particules grossières (PM₁₀) et 5 428 tonnes de dioxyde de carbone (CO₂) tandis que le patrimoine arboré actuel a produit plus d'ozone (O₃) qu'il n'en a éliminé (formation : 336 tonnes, élimination ; 111 tonnes), principalement en raison du fort potentiel de formation d'ozone des palmiers. A Bucarest, les 370 866 arbres adultes ont éliminé 171 tonnes NO₂, 94 tonnes PM₁₀ et 236 tonnes d'O₃ en 2024.

Mots clés à retenir de l'étude

Analyse spatiale, Attributs descriptifs, Classification, Forêt urbaine, Imagerie satellitaire, Pléiades, Services Ecosystémiques, Télédétection, Végétation.

Partenariat

ACRI-ST est une Petite et Moyenne Entreprise (PME) française, fondée en 1989, spécialisée dans l'observation de la Terre depuis l'espace et dans le traitement de grandes quantités de données satellitaires. Son siège se situe à Sophia-Antipolis (Alpes-Maritimes), avec plusieurs implantations en France (Paris, Toulouse, Grasse, Brest). ACRI-ST intervient sur l'ensemble de la chaîne de l'observation spatiale - depuis la simulation et la spécification des capteurs jusqu'au traitement, au retraitement, à l'archivage et à la distribution des données. ACRI-ST développe des processeurs de données, des simulateurs « bout à bout » pour capteurs spatiaux, des chaînes opérationnelles, des systèmes de contrôle qualité, ainsi qu'un *data center* pour gérer d'importants volumes de données.

Les travaux d'ACRI-ST couvrent des domaines variés : observation des océans, des littoraux, des espaces naturels, de l'atmosphère, des milieux terrestres, et même de l'Univers en s'étendant vers l'astrophysique et la science planétaire. ACRI-ST a été désignée comme centre de traitement et d'archivage des données pour des missions majeures - par exemple les satellites Sentinel-2 et Sentinel-3 - dans le cadre du programme européen Copernicus. L'entreprise fournit également des services d'analyse environnementale, d'aide à la décision pour des acteurs publics ou privés (gestion de zones côtières, aquaculture, qualité de l'eau, foresterie urbaine, etc.). Cette capacité à combiner expertise scientifique, traitement de données massives et services applicatifs lui donne une place stratégique parmi les acteurs européens de l'observation spatiale et environnementale. ACRI-ST collabore depuis plus de 30 ans avec des agences spatiales nationales et européennes (par exemple l'Agence Spatiale Européenne (ESA), le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), l'Agence Européenne de satellites météorologiques, EUMETSAT), ainsi qu'avec des institutions de recherche et des organismes publics à l'international.

Le **Centre Méditerranéen d'Études Environnementales (CEAM)** est un centre de recherche, de développement et d'innovation dédié à l'environnement en région méditerranéenne. Le CEAM se situe à Valence (Espagne) et propose des solutions globales de gestion environnementale - en tenant compte des interactions entre l'atmosphère, les écosystèmes, les activités humaines et les conditions spécifiques de climat et d'écosystème méditerranéens. L'équipe scientifique comprend des experts en météorologie et climat, chimie et dynamique atmosphériques, simulation numérique, instruments analytiques de haute précision, dynamique des écosystèmes, et restauration forestière. Les activités vont de la recherche fondamentale au développement de nouvelles technologies et applications, mises en place sous forme de projets pilotes. Le CEAM dispose d'infrastructures de pointe, par exemple le photo-réacteur atmosphérique EUPHORE, l'un des plus importants d'Europe, utilisé pour simuler des processus chimiques atmosphériques en conditions quasi-réelles et analyser les effets de la pollution, des émissions naturelles ou anthropiques, et leurs impacts sur la santé et l'environnement.

1. Contexte et objectifs

Les villes européennes font face à des **défis environnementaux majeurs** dus au changement climatique, à la pollution de l'air et à une urbanisation toujours plus croissante. D'ici 2050, près de 84 % de la population de l'Union Européenne (UE) vivra en ville, ce qui intensifie l'exposition des citoyens aux polluants atmosphériques et aux vagues de chaleur. Dans des villes comme Valencia (Espagne) ou Bucarest (Roumanie), une augmentation de **+ 2,5 °C à + 3,5 °C** des températures estivales est attendue d'ici 2050, ce qui accentue le besoin de repenser les stratégies d'aménagement urbain. Les épisodes extrêmes, tels que les canicules et pics de pollution, menacent directement la santé, la biodiversité et la qualité de vie des citoyens.

Les arbres sont les éléments les plus importants des écosystèmes urbains (Ostberg et al., 2018) et contribuent à fournir des bénéfices sociaux et environnementaux (**services écosystémiques**): réduction de la pollution de l'air (Nowak et al., 2018), régulation de la température de l'air (Manes et al., 2012), atténuation des îlots de chaleur urbains (Ren et al., 2022), amélioration de la biodiversité (Liu et Slik, 2022), séquestration du carbone (Proietti et al., 2016), ombrage (Rahman et al., 2020), limitation de l'érosion et régulation du ruissellement (Pataki et al., 2011), réduction du bruit (Klingberg et al., 2017) ainsi que fournir des avantages récréatifs, sociaux, psychologiques et esthétiques pour améliorer le bien-être des citoyens (Ugolini et al., 2020). Une étude récente montre que l'augmentation du couvert arboré à 30% dans 744 villes européennes de plus de 50 000 habitants pourrait permettre d'éviter jusqu'à **12 000 décès par an** (Sicard et al., 2025).

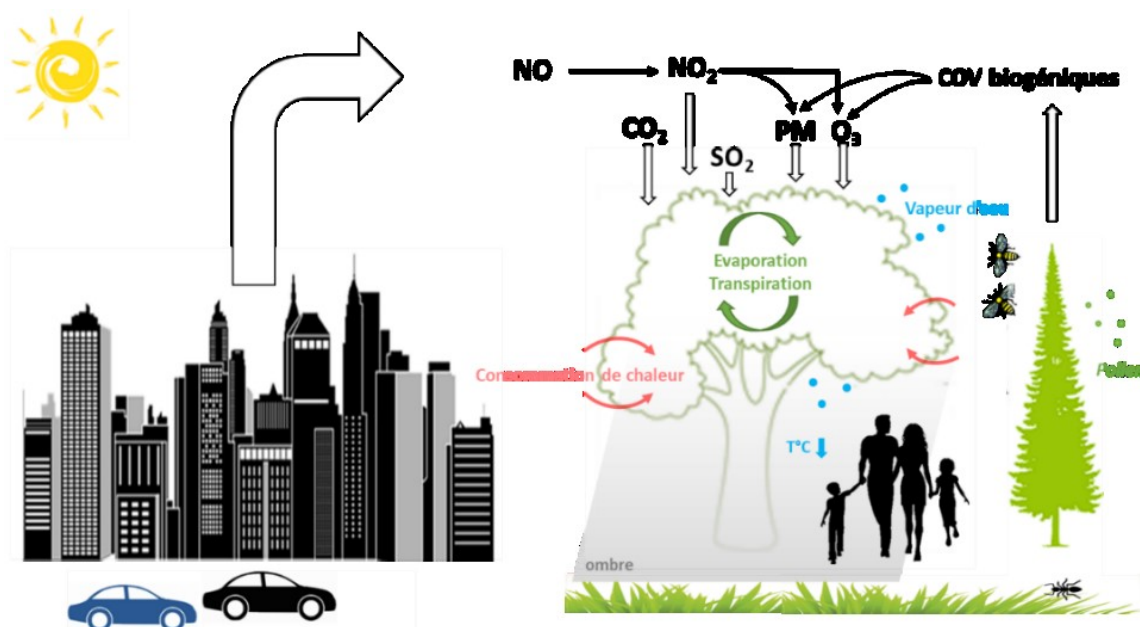


Figure 1 - Interactions entre émissions anthropiques de polluants, pollution de l'air, espaces verts, biodiversité et bien-être des citoyens.

Dans ce contexte, optimiser l'intégration de la végétation en ville apparaît comme l'une des solutions les plus pertinentes. L'UE a traduit ces enjeux en obligations réglementaires: la **Stratégie Biodiversité 2030** demande aux municipalités de plus de 20 000 habitants de développer un **plan de verdissement ambitieux** (COM(2020)380) tandis que le règlement sur la **restauration de la nature** (2024/1991) impose qu'aucune perte nette d'espaces verts ne soit tolérée d'ici 2030 et une progression mesurable dès 2031. Toutefois, planter davantage d'arbres ne suffit pas: il est **essentiel de planter les bonnes essences au bon endroit**. Une (re)végétalisation mal conçue peut produire des effets inattendus, notamment lorsqu'elle inclut des espèces fortement émettrices de Composés Organiques Volatils (COV) biogéniques, tels que l'isoprène ou les monoterpènes, qui participent à la formation d'ozone. Des stratégies de verdissement improvisées peuvent aggraver la pollution de l'air et accentuer les crises d'asthme chez les populations sensibles (Eisenman et al., 2019).

Quelles espèces végétales face au réchauffement climatique ? Quelles espèces végétales sont les plus appropriées pour améliorer la qualité de l'air ? Les **urbanistes et décideurs publics manquent d'outils** pour concevoir des **stratégies de verdissement efficaces**, par exemple pour identifier les zones à verdir, sélectionner les espèces végétales appropriées et quantifier les bénéfices rendus par les espaces verts.

Pour estimer les bénéfices environnementaux des arbres urbains, des paramètres spécifiques sont nécessaires, tels que l'espèce, sa localisation, sa hauteur et l'indice foliaire (Pu et Landry, 2019). Ces données peuvent être obtenues à partir d'inventaires municipaux (Selmi et al., 2016) ou collectées par observations visuelles (Persson, 2016). Cependant, cette collecte de données présente des inconvénients: elle est relativement **coûteuse et chronophage** (Klingberg et al., 2017) ou ne concerne qu'un nombre d'arbres non représentatif (Sicard et al., 2023). En effet, les inventaires municipaux ne recensent qu'une faible proportion des arbres publics (< 20 %) car la majorité (> 80 % dans certaines villes) se situe dans des propriétés privées, ce qui rend leur identification impossible sans recours aux techniques de télédétection.

Depuis les années 2000, la résolution spatiale des capteurs optiques des satellites à très haute résolution (THR) permet de détecter et d'estimer certaines caractéristiques des arbres à l'échelle du paysage, par exemple GeoEye-1 (Qian et al., 2020), IKONOS (Pu et Landry, 2012), WorldView (Choudhury et al., 2019) et Pléiades (Effiom, 2018; Pu et Landry, 2019), pour un coût inférieur à celui des observations de terrain ou du LiDAR aéroporté (Persson, 2016). La détection des arbres individuels et la **différenciation des essences** sont plus difficiles en milieu urbain, car les arbres peuvent être isolés, alignés ou regroupés en bosquets, avec une grande variété d'espèces, une forte similarité spectrale entre types de végétation, des peuplements denses, des arbres ombragés, une faible différence spectrale, et la proximité de bâtiments voisins (Klingberg et al., 2017; Choudhury et al., 2019).

Une **approche géospatiale intégrée**, couplant imagerie satellite THR (tels que Pléiades), analyse texturale, classification d'objets et Système d'Information Géographique (SIG), permet de cartographier finement les canopées, d'identifier les essences dominantes et d'analyser leurs caractéristiques structurelles. Les images tri-stéréoscopiques permettent d'estimer la hauteur des arbres, ce qui constitue une avancée majeure pour la quantification des services écosystémiques. Les premiers démonstrateurs déployés à Aix-en-Provence (France), Florence (Italie) et Kaunas (Lituanie) ont confirmé la robustesse de cette méthodologie, aussi bien dans les espaces publics que privés.

Au-delà de l'inventaire, l'enjeu consiste à **quantifier les bénéfices environnementaux** réels fournis par les arbres, par exemple leur capacité à éliminer le dioxyde d'azote (NO_2), les particules grossières (PM_{10}), l'ozone troposphérique (O_3), et la séquestration du dioxyde de carbone (CO_2). Ces estimations nécessitent une combinaison de données satellitaires, de modèles physiques et biochimiques, ainsi que d'informations sur l'essence ou la structure de la canopée.

Afin de compléter les inventaires municipaux, de quantifier de manière réaliste les services fournis par les arbres, et d'aider les autorités locales à élaborer des plans de verdissement urbain pour i) améliorer la qualité de l'air, ii) améliorer les habitats des pollinisateurs et des oiseaux, et iii) renforcer la résilience climatique, **SCO GreenSpace** propose, par télédétection spatiale, aux collectivités locales :

#1 - Inventaire complet du patrimoine arboré

Grâce à une analyse d'images satellites à THR et un SIG, notre approche permet de détecter, compter, catégoriser et cartographier les espèces d'arbres pour fournir un inventaire complet des arbres (privés et publics). Cet inventaire complet doit permettre de quantifier de manière réaliste les services fournis par les arbres.

#2 - Estimation des bénéfices environnementaux du patrimoine arboré

La végétation facilite le dépôt des particules (PM_{10}) et des gaz sur la surface des plantes, et absorbe les polluants atmosphériques gazeux (CO_2 , NO_2 et O_3) au travers des stomates, entraînant une amélioration efficace à long terme de la qualité de l'air à l'échelle de la ville. Partant de l'inventaire complet (nombre, localisation, espèces) du patrimoine arboré, public et privé, à l'échelle de la collectivité, nous quantifions (en tonnes par an) la capacité du patrimoine arboré à éliminer les principaux polluants et à séquestrer les gaz à effet de serre (CO_2 et O_3). Nous obtenons pour chaque arbre, par une analyse d'images satellites en tri-stéréoscopie, des données précises sur leurs caractéristiques structurelles (hauteur de l'arbre, indice de surface foliaire) qui sont essentiels afin de quantifier la capacité de stockage du carbone.

#3 - Recommandations pour un air plus sain

Planter la bonne essence au bon endroit - Quelles espèces végétales sont les plus appropriées pour améliorer la qualité de l'air et séquestrer le carbone, et lesquelles doivent être évitées? SCO GreenSpace propose des recommandations afin de mettre en œuvre une politique de plantation avec une liste d'espèces appropriées à planter pour un air plus sain.

Un premier démonstrateur a été déployé dans 3 villes (Aix-en-Provence, Florence, Kaunas) en 2023. Désormais, les services ci-dessus sont entièrement prototypés sur **2 villes supplémentaires** en Europe (Valencia et Bucharest) représentatives de contextes climatiques et urbains contrastés (Fig. 2), afin d'affiner les modèles et d'élargir la transférabilité de la méthodologie en Europe.

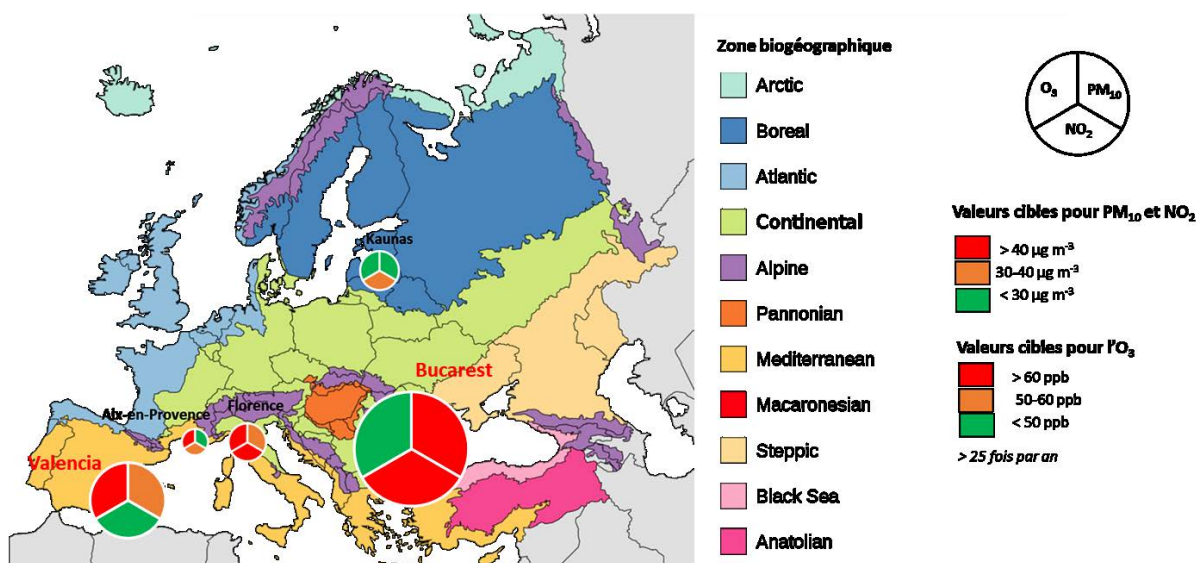


Figure 2 - Localisation des villes où les services SCO GreenSpace ont été déployés, en fonction des niveaux de pollution atmosphérique en 2022.

2. Méthodologie

Nous détectons et classifions les arbres individuels (privés et publics) à l'aide d'images à THR (Pléiades) disponibles sur les 2 villes en été. Le mode stéréoscopique de Pléiades fournit aussi des modèles numériques de surface. Le modèle FlorTree permet de quantifier la capacité d'élimination des principaux polluants atmosphériques (O_3 , NO_2 , PM_{10} , CO_2). **SCO GreenSpace** a permis de développer une **méthodologie applicable à toutes les villes et métropoles**, en limitant l'usage de données locales et le nombre d'images satellitaires d'entrée pour réduire les coûts.

2.1. Distribution, classification, et cartographie des espaces verts

Sicard et al., 2023 ont développé une approche pour détecter, délimiter et classer la végétation urbaine par satellite dans les zones publiques et privées, avec la sélection de caractéristiques spectrales et texturales pertinentes pour chaque espèce végétale. Les principales caractéristiques des arbres individuels (par exemple, l'espèce et la hauteur) sont dérivées à l'aide d'une approche de classification, de techniques de prétraitement comprenant la correction atmosphérique, le pan-sharpening et la correction spatiale à partir d'images satellite à THR Pléiades.

2.1.1. Images satellites

Pléiades, développée par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), est un système à deux satellites optiques Pléiades 1A (lancé en 2011) et 1B (lancé en 2012). Le couple de satellites se déplacent sur la même orbite quasi-polaire et héliosynchrone avec un déphasage de 180° avec une altitude de vol de 694 km et un cycle orbital de 26 jours. Un des avantages de ces satellites est que le capteur va pouvoir, selon une demande particulière, modifier la direction de sa visée et acquérir ainsi des images à la verticale et aussi avec des angles différents et donc permettre la vision stéréoscopique. Les images panchromatiques et multispectrales sont livrées séparément.

Pour une cartographie précise de la végétation urbaine, des données à THR spatiale sont nécessaires, d'où l'utilisation des images satellitaires **Pléiades** qui offrent une **résolution de 50 cm** et **4 bandes spectrales**, permettant de dériver plusieurs indices radiométriques. Les images géoréférencées Pléiades, à une résolution de 2 m, comportent 4 bandes multispectrales : bleu (430–550 nm), vert (500–620 nm), rouge (590–710 nm) et proche infrarouge (740–940 nm), ainsi qu'une bande panchromatique de 0,5 m de résolution spatiale (470–820 nm). Les dates d'acquisition des images Pléiades ont été choisies en tenant compte de conditions de ciel dégagé sur la zone d'étude ($< 2\%$ de couverture nuageuse) et un faible angle de visée hors nadir afin de limiter les décalages d'images (Tab. 1, Fig. 2). Les images ont été fournies ortho-rectifiées avec un niveau de traitement primaire, incluant des corrections radiométriques et des distorsions liées au capteur. Toutes les images présentent une résolution radiométrique de 16 bits.

Le mode stéréoscopique de Pléiades fournit aussi des Modèles Numériques de Surface (MNS). Les données Pléiades sont peu coûteuses grâce au dispositif Dinamis. L'image de référence doit être acquise entre **mai et septembre** durant la période de croissance de la végétation. Pour la donnée d'élévation, le **mode tri stéréoscopique** doit idéalement être choisi pour l'image d'été.

Tableau 1: Caractéristiques des images Pléiades

Satellite	Date	Surface (km²)	Latitude	Longitude	Couvert nuageux	Angle d'incidence (°) et orientation			
							Début	Milieu	Fin
Bucharest	23/09/2024	350	N044°33'23"	E025°59'21"	0.13%	Orientation	180.00	179.99	180.02
PHR1A			N044°33'27"	E026°14'25"		Global	5.24	5.32	5.41
			N044°19'32"	E026°14'23"		Accros	3.89	3.99	4.09
			N044°19'27"	E025°59'24"		Along	2.88	3.87	2.86
						Solar azimuth	138.33	138.25	138.17
						Solar elevation	69.18	69.22	69.25
Valencia	07/06/2022	123	N039°31'09"	W000°26'27"	0.32%	Orientation	179.96	179.99	179.94
PHR1A			N039°31'08"	W000°18'46"		Global	7.63	7.54	7.46
			N039°25'04"	W000°18'46"		Accros	-1.89	-1.63	-1.40
			N039°25'06"	W000°26'27"		Along	6.77	6.75	6.73
						Solar azimuth	162.60	162.56	162.53
						Solar elevation	43.95	44.07	44.17



Figure 2 – Images satellite Pléiades acquise le 07 juin 2022 à Valencia (gauche, 123 km²) et le 23 septembre 2024 à Bucharest (droite, 350 km²).

2.1.2. Inventaire des arbres

La ville de Valencia dispose d'un inventaire exhaustif des arbres publics (par ex., localisation, espèce), qui est tenu à jour par les municipalités responsables de l'arrosage, alors que la ville de Bucarest ne dispose d'aucun inventaire des arbres publics. Nous avons donc mené une mission de terrain afin d'établir un inventaire des espèces dominantes. Les deux inventaires d'arbres ont été cartographiés à l'aide de Quantum Geographic Information System (QGIS) et utilisés comme échantillons d'apprentissage (70 % des données de l'inventaire) et comme jeu de validation (30 % des données). Les espèces d'arbres les plus abondantes inventoriées sont : *Platanus acerifolia*, *Tilia* spp., *Populus* spp., et *Fraxinus excelsior*. Dans le centre et en périphérie, la plupart des arbres sont plantés le long des boulevards, sur les places et dans les jardins privés.

2.1.3. Segmentation et processus de classification

Le schéma de la procédure est présenté à la Fig. 3. Python, la Geospatial Data Abstraction Library (GDAL), l'Orfeo Toolbox (OTB) et le logiciel QGIS ont été utilisés pour le post-traitement de la segmentation, de la classification et de la cartographie des résultats. L'approche repose sur l'apprentissage automatique à partir de données *in situ* et sur une classification par *Random Forest* utilisant des indices de végétation.

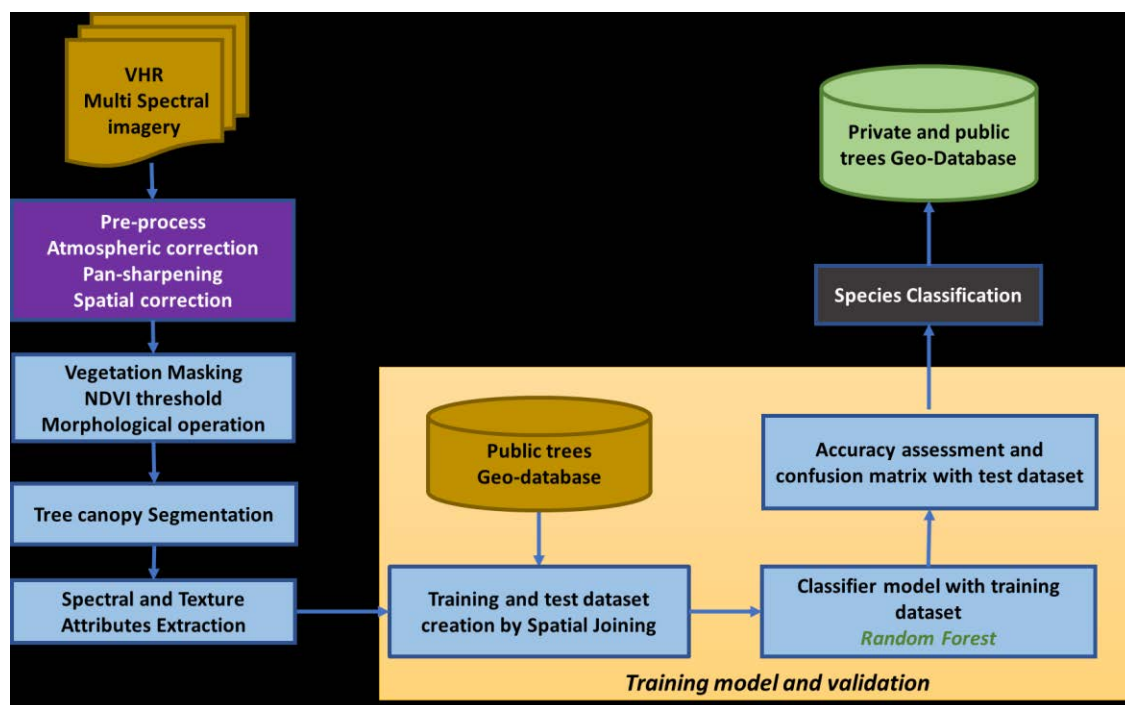


Figure 3 – Schéma de la procédure d'analyse pour l'identification, la délimitation et la classification de la végétation urbaine à l'aide d'images Pléiades à très haute résolution.

Prétraitement des images

Les images multispectrales (MS) ortho-rectifiées et corrigées radiométriquement sont fusionnées avec les images panchromatiques (PAN) correspondantes à l'aide d'une **méthode de pan-sharpening**. Le pan-sharpening des images MS à basse résolution avec les images PAN à THR est important pour la détection, la segmentation et la classification d'objets afin d'améliorer la précision de l'analyse photo et l'extraction des caractéristiques (Jones et al., 2020). Les algorithmes de pan-sharpening les plus performants en télédétection sont Brovey, Gram-Schmidt et l'Analyse en Composantes Principales (Sarp, 2014). L'algorithme Brovey « pondéré » est utilisé via un script de traitement GDAL. Lors du processus de Brovey, une intensité pseudo-PAN est calculée, et chaque pixel MS est multiplié par le ratio de l'intensité du pixel PAN sur l'intensité pseudo-PAN (Sarp, 2014) :

$$DN_{\text{fusedMSi}} = \frac{DN_{bi}}{DN_{b1} + DN_{b2} + \dots + DN_{bn}} DN_{\text{PAN}}$$

où DN est le nombre numérique de la bande et b_i correspond à la bande de l'image MS. Ce traitement de pan-sharpening permet d'obtenir des images avec une résolution spatiale de 0,5 m sur l'ensemble des 4 bandes spectrales en fusionnant l'image MS de 2 m avec l'image PAN de 0,5 m (Fig. 4).



Figure 4 - Prétraitement de l'image Pléiades à l'aide d'une approche de Pansharpening. Le Pansharpening de l'image multispectrale à plus basse résolution (gauche) est important pour améliorer la précision de l'image multispectrale finale (droite).

Système de masquage étape par étape

Après le pan-sharpening, les zones d'étude sont séparées en surfaces végétalisées et non végétalisées (Fig. 5) à l'aide d'une approche pixel par pixel basée sur le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) :

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + \rho_{red}}$$

où ρ_{NIR} et ρ_{red} sont les réflectances spectrales mesurées dans le proche infrarouge et le rouge (visible), respectivement.

Le seuil optimal de NDVI est défini à partir de l'histogramme et par interprétation visuelle de l'image, puis affiné avec un incrément de 0,01 pour déterminer le seuil correspondant le mieux aux données de référence (Pu et Landry, 2012).

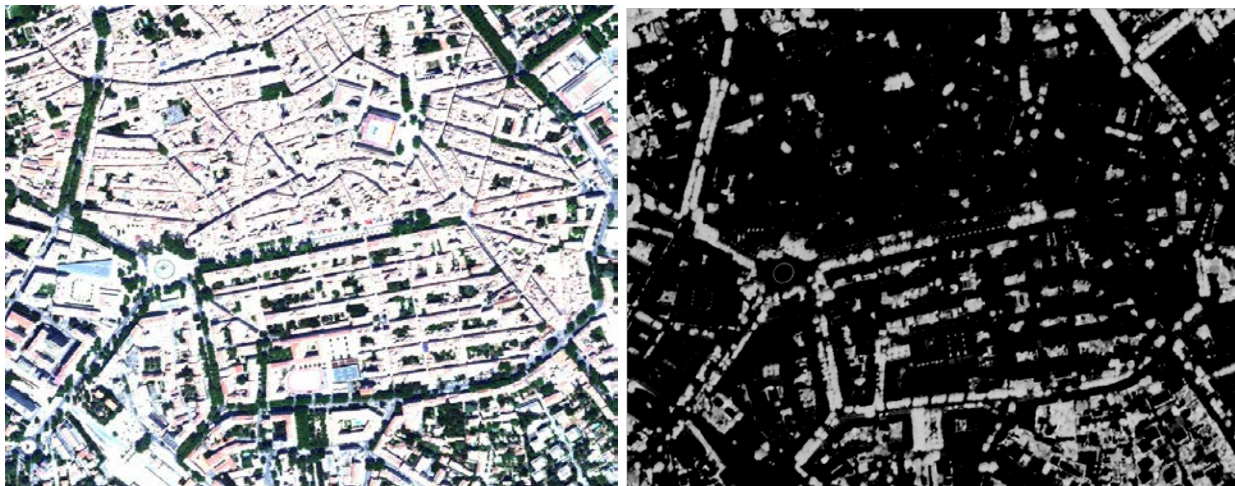


Figure 5 - Pour la classification, les pixels ayant un NDVI supérieur à 0,40 (en gris) ont été classés comme zones végétalisées à Aix-en-Provence, tandis que les pixels avec un NDVI inférieur (en noir) ont été classés comme zones non végétalisées (c.-à-d. bâtiments, trottoirs).

Une opération morphologique d'érosion-dilatation est appliquée au masque NDVI, utilisant un élément structurant sphérique de trois pixels de rayon, afin de supprimer les ombres autour des arbres. Pour dissocier les surfaces herbacées des surfaces arborées, nous utilisons l'indice *Tree-Grass Differentiation Index* (TGDI) développé par Qian et al. (2020). Les valeurs de pixels des bandes de l'image peuvent refléter la brillance de la couverture terrestre, tandis que le contraste entre les pixels peut représenter le lissage et aider à détecter les contours. Qian et al. (2020) décrit le TGDI comme:

$$TGDI = -\log_{10}(\text{Canny}) * \text{Brightness}$$

Le détecteur de contours *Canny* est un algorithme multi-étape qui fournit des contours plus précis dans les images en i) appliquant un flou gaussien pour supprimer le bruit, ii) calculant les gradients d'intensité à l'aide des filtres Sobel, et iii) supprimant les contours faibles.

Segmentation des images

La segmentation des images en polygones (ou objets) représentant les zones végétalisées (groupes de pixels adjacents et spectralement similaires) est réalisée pour délimiter les arbres individuels, les forêts urbaines, les arbustes et les pelouses. L'algorithme de *watershed* est appliqué avec différentes tailles de fenêtre (de 5 à 20 pixels) et différentes plages de *Digital Number* (DN de 100 à 250). Les valeurs DN représentent l'intensité du signal détecté par le capteur dans une bande spectrale donnée. Une petite taille de fenêtre (ex. 5 x 5 pixels) ou une petite plage de DN (ex. 100) provoque une sur-segmentation, tandis qu'une grande fenêtre ou une large plage de DN entraîne une sous-segmentation (Fig. 6). L'algorithme a finalement été utilisé avec une taille de fenêtre de 10 pixels et une plage de 150 DN (Fig. 6). La délimitation des couronnes des arbres par *watershed* est particulièrement adaptée à la classification (Niccolai et al., 2010). Enfin, des caractéristiques spectrales et spatiales sont calculées pour chaque objet afin de décrire les propriétés texturales de chaque zone végétalisée, qu'il s'agisse de couronnes d'arbres ou de pelouses (Pu et Cheng, 2015).

2.3.5. Extraction des caractéristiques texturales

L'analyse texturale permet de prendre en compte les relations spatiales des valeurs spectrales au sein des pixels (Maack et al., 2015). L'analyse de co-occurrence, en particulier la méthode de la *Grey Level Co-occurrence Matrix* (GLCM) avec ses attributs associés, est largement utilisée en télédétection (Beguet et al., 2014; Maack et al., 2015; Immitzer et al., 2016). Dix attributs texturaux de type Haralick sont calculés à partir de la GLCM pour chaque bande spectrale, en ne conservant que les zones végétalisées (Tab. 2). Les caractéristiques texturales sélectionnées ont démontré leur potentiel pour l'estimation des caractéristiques des arbres à partir d'images satellitaires à très haute résolution (Regniers, 2014; Beguet et al., 2014; Lefebvre et al., 2016; Zhou et al., 2017).

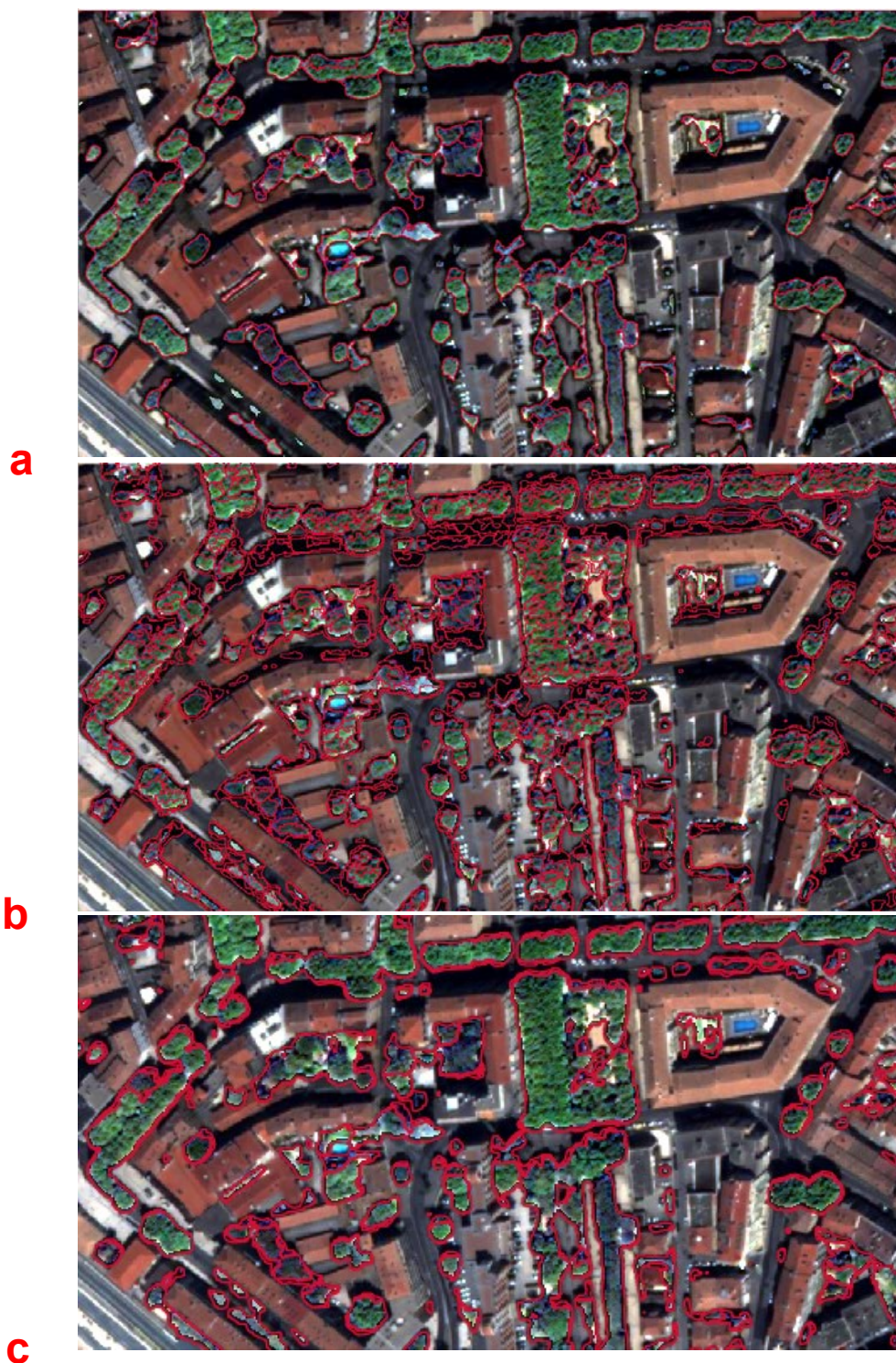


Figure 6 – Segmentation de la couronne des arbres – L’algorithme de *watershed* est utilisé avec différentes tailles de fenêtre: par exemple 10 pixels et une plage de 150 DN (a); 10 pixels et une plage de 100 DN (b); et 20 pixels et une plage de 250 DN (c).

Tableau 2 – Description des caractéristiques basées sur la texture (provenant de l’Orfeo Toolbox) calculées pour chaque bande spectrale.

Attribut	Formule	Attribut	Formule
Valeur moyenne du pixel	$\sum_{i,j=0}^{N-1} i\rho(i,j) = \mu$	Variance – Mesure de l’hétérogénéité de la texture	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \rho(i,j)(i - \mu)^2 = \sigma^2$
Energie	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \rho(i,j)^2$	Entropie – Mesure de l’aléa de l’image d’intensité	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \rho(i,j)(-\ln \rho(i,j))$
Corrélation entre le pixel et son voisinage	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \rho(i,j)^2 \frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{\sigma_i^2 \sigma_j^2}}$	Moment différentiel inverse - Mesure de l’ homogénéité de la texture	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{1}{1 + (i - j)^2} \rho(i,j)$
Inertie – Contraste d’intensité entre un pixel et son voisinage	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \rho(i,j)(i - j)^2$	Ombre de cluster – Asymétrie	$\sum_{i,j=0}^{N-1} ((i - \mu) + (j - \mu))^3 \rho(i,j)$
Contraste – Variation locale d’intensité	$\sum_{i,j=0}^{N-1} ((i - \mu) + (j - \mu))^4 \rho(i,j)$	Corrélation Haralick	$\frac{1}{\sigma^2} \sum_{i,j=0}^{N-1} (i,j)\rho(i,j) - \mu^2$

Note: i et j sont les numéros de ligne/colonne dans une matrice de dépendance spatiale; $\rho(i,j)$ est la valeur de fréquence dans la cellule i,j de la matrice; N est le nombre de lignes ou de colonnes et correspond au nombre de niveaux de gris; σ est l’écart-type des sommes des lignes (ou des colonnes).

Les attributs d’Haralick les plus utilisés dans la littérature, comme l’énergie, le contraste, la corrélation, la variance, l’homogénéité et l’entropie, ont fait l’objet d’analyses intuitives en ce qui concerne leur apport pour la caractérisation des textures :

- ✓ l’**énergie** mesure l’homogénéité globale de l’image.
- ✓ le **contraste** mesure les variations locales des couleurs présentes dans l’image à analyser. Une valeur faible de cet attribut caractérise une texture plutôt uniforme.
- ✓ la **corrélation** permet de mesurer les dépendances linéaires entre les niveaux des composantes couleur dans l’image.
- ✓ la **variance** mesure la répartition d’une composante couleur autour de la valeur moyenne. Plus cet attribut est élevé et plus importants sont les écarts entre les valeurs prises par la composante couleur et la moyenne.
- ✓ l’**homogénéité** traduit l’homogénéité locale au sein de la texture.
- ✓ l’**entropie** donne une information quant au désordre que peut présenter la texture.

Une analyse en composantes principales a été appliquée pour extraire les attributs texturaux les plus utiles. Quatre attributs Haralick (**énergie, entropie, homogénéité et corrélation de Haralick**) se sont révélés suffisants pour décrire la texture végétale pour toutes les bandes. Ensuite, la valeur moyenne de chaque attribut pour chaque bande spectrale est extraite à travers les polygones de canopée segmentés. Enfin, chaque zone végétalisée est caractérisée par 16 attributs texturaux (4 bandes PS $\times$ 4 caractéristiques).

2.3.6. Base d'apprentissage et de validation

Les deux inventaires indépendants d'arbres sont cartographiés à l'aide de QGIS et utilisés comme échantillons d'apprentissage (70 % des données de l'inventaire) et comme jeu de validation (30 % des données). Les échantillons d'apprentissage sont déterminés par jointure spatiale entre les images Pléiades et l'inventaire des arbres (Fig. 7). Au total, 16 caractéristiques texturales sont extraites pour chaque échantillon d'apprentissage et utilisées comme signature de référence pour l'algorithme de classification (Choudhury et al., 2020).



Figure 7 – Jointure spatiale entre l'inventaire des arbres (points orange) et les polygones de canopée segmentés (zone verte) afin de récupérer les caractéristiques basées sur la texture pour chaque échantillon d'espèce d'arbre.

2.3.7. Classification des espèces végétales

Les caractéristiques texturales sont calculées sur la zone d'étude. Pour l'attribution des objets aux différentes classes, c'est-à-dire la classification des espèces végétales, un *algorithme Random Forest* (RF) est utilisé avec les signatures de référence calculées à partir des échantillons d'apprentissage (Immitzer et al., 2012). La classification supervisée RF est robuste pour séparer les classes par leurs propriétés spectrales (Immitzer et al., 2016; Huesca et al., 2019). Pour chaque objet, nous récupérons les coordonnées géographiques (latitude, longitude) et la classe finale assignée.

2.3.8. Qualité de la classification

La qualité de la classification est évaluée par comparaison avec les données de validation représentant la « *vérité terrain* ». Le **coefficient Kappa** évalue la performance de la classification par rapport à un classement aléatoire. Il varie de -1 à 1, une valeur proche de 1 indiquant que la classification est significativement meilleure que le hasard.

$$k = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e}$$

où p_o est l'accord observé et p_e l'accord attendu par hasard.

2.2. Estimation du diamètre du houppier des arbres

Pour évaluer quantitativement la capacité des arbres urbains à réduire la pollution de l'air, l'extraction du diamètre du houppier est un élément essentiel. Dans l'hypothèse où l'ozone affecte principalement la surface supérieure du houppier, la détection des arbres dominants n'a pas d'incidence significative sur les résultats. Le principe de démarcation des couronnes est fondé sur le regroupement de pixels ou groupes de pixels appartenant à un même arbre. L'algorithme de *croissance de région* (*Region Growing*) fait partie des algorithmes couramment utilisés dans le domaine de la segmentation d'images. Cette technique consiste à faire progressivement grossir les régions autour de leur point de départ. L'étape de croissance va utiliser une mesure de similarité pour choisir les pixels agglomérer, et peut être adaptée pour la délimitation des couronnes d'arbres individuels (Gonzales, 2008).

2.3. Estimation de la hauteur d'arbres

La hauteur des arbres individuels est un paramètre fondamental de l'inventaire des arbres en ville et est utilisée pour estimer le stock de carbone. Les données LiDAR (*Laser Imaging Detection And Ranging*) sont les plus utilisées pour aider aux inventaires forestiers (Yu et al., 2015). Les méthodes traditionnelles de mesure de la hauteur des arbres impliquent l'évaluation visuelle de la cime des arbres et l'utilisation de calculs trigonométriques de base. Cependant, les mesures terrain au niveau de l'arbre sont coûteuses, prennent du temps et ne sont pas réalisables pour de grandes zones ou pour des résolutions temporelles élevées (Silva et al., 2016). Ces limitations peuvent être surmontées en utilisant la télédétection pour obtenir des informations précises à grande échelle.

Bien que nombreuses études montrent des résultats un peu moins précis que ceux obtenus avec le LiDAR (Piermattei et al., 2019), les paires d'images stéréo optiques à THR spatiale permettent de faire de la photogrammétrie afin d'estimer la hauteur de la canopée (Modèle Numérique de Hauteur) à l'aide d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), d'extraire les tailles des couronnes des arbres et d'estimer d'autres paramètres à l'aide de relations allométriques.

Cette méthode est de plus en plus utilisée, soit en utilisant des images satellitaires sur les petites zones (notamment Pléiades) ou en utilisant les recouvrements d'images lors de l'acquisition d'images aériennes.

Le principe de la stéréoscopie repose sur le fait d'avoir des géométries d'acquisition différentes d'une même cible, ce qui permet de reproduire une perception du relief en tous points visibles sur les 2, 3 ou n images. L'avantage de la **tri-stéréoscopie** par rapport à la stéréoscopie classique est de minimiser les zones cachées grâce à la visée quasi-nadir qui s'ajoute aux deux visées standards avant et arrière. Cette technique permet de générer des MNS 3D plus précis que ceux obtenus par stéréoscopie standard. L'acquisition des triplets stéréoscopiques est quasi-simultanée et s'effectue de façon que le capteur radiométrique vise la même scène en arrière, en avant et en position proche-nadir.

Création du modèle numérique de hauteur (MNH)

Nous cherchons à extraire le modèle numérique de hauteur pour estimer la hauteur des arbres. La soustraction du MNT au MNS permet d'obtenir le modèle numérique d'élévation (MNE). Le MNS produit sous MicMac représente le sol, le sursol et l'ondulation de géoïde. Cependant, le MNT représente la différence entre le sol et le géoïde, donc pour obtenir les valeurs de la hauteur, nous devons retrancher l'ondulation du géoïde et le MNT du MNS initialement obtenu.

$$\text{MNH} = \text{MNS} - (\text{MNT} + \text{Ondulation de géoïde})$$

Étant donné que l'erreur sur le MNH est généralement métrique, certains petits arbres ne seront pas détectables, il en va de même pour les arbres avec une cime fine. La majorité des arbres sont des feuillus, caractérisés par des troncs nus avec un houppier haut et généralement de forme sphérique qui fait plus de 2m pour les arbres adultes (par exemple les platanes, tilleuls et micocouliers). Ces caractéristiques assurent une bonne visibilité stéréoscopique et une détection facile. Certains conifères ont un aspect élancé, parfois de la même taille sur tout l'axe vertical (par exemple l'if ornemental) et donc difficilement détectables.

2.4. Cartographie et évaluation des services écosystémiques

Nous utilisons un modèle innovant (FlorTree) pour quantifier la capacité d'élimination des polluants atmosphériques d'environ 220 espèces végétales, par exemple le CO₂, NO₂, O₃ et PM₁₀.

2.4.1. Données qualité de l'air et météorologiques

Les données horaires de qualité de l'air (CO₂, O₃, NO₂, et PM₁₀) et météorologiques (température de l'air, humidité relative, vitesse et direction du vent, rayonnement global) proviennent respectivement de stations de surveillance du Réseau de Qualité de l'Air de Valence (<http://www.agroambient.gva.es>) et du Réseau National de Surveillance de la Qualité de l'Air (<https://www.calitateaer.ro>). Les données météorologiques se réfèrent à une station située dans le centre-ville de Valencia (39°27'27" N – 0°20'34" E – 3 m d'altitude) et de Bucarest (44°26'50" N – 26°02'12" E – 91 m d'altitude). Les données horaires de qualité de l'air et météorologiques ont été obtenues pour l'année 2022 à Valencia et l'année 2024 à Bucarest, avec plus de 75 % des données horaires validées (Tab. 3). Les zones représentatives des stations de fond urbaines sont de 8 à 43 km² pour le NO₂, de 35 à 79 km² pour les PM₁₀ et de 94 à 105 km² pour l'O₃ (Kracht et al., 2017). La principale source de pollution de l'air est le trafic, tandis que d'autres sources incluent les industries autour de la ville et l'aéroport.

Tableau 3 - Valeurs moyennes des paramètres environnementaux et des concentrations de polluants atmosphériques (O₃, PM₁₀, NO₂) pour Valencia (2022) et Bucharest (2024).

Saison	Vitesse du vent (m s ⁻¹)	Température de l'air (°C)	Humidité relative (%)	Rayonnement global (W m ⁻²)	O ₃ (µg m ⁻³)	NO ₂ (µg m ⁻³)	PM ₁₀ (µg m ⁻³)
Bucarest							
Été	0.90	24.90	61.60	177.50	65.60	24.10	27.50
Hiver	1.36	2.78	84.46	31.86	28.14	34.94	34.96
Valencia							
Été	1,8	25,7	46,5	309,7	86,8	53,1	21,8
Hiver	1,7	6,8	74,3	70,1	41,0	68,7	37,3

2.4.2. Quantification de la capacité d'élimination des polluants

La végétation facilite le dépôt des matières particulaires et des polluants gazeux sur la surface des feuilles/aiguilles, tronc et branches, et absorbe les polluants gazeux (NO₂, CO₂ et O₃) à travers les stomates des feuilles (Nowak et al., 2018). Une telle absorption de polluants atmosphériques par les plantes est considérée comme un **moyen efficace** pour **améliorer la qualité de l'air** à l'échelle de la ville à **long terme**. La végétation régule aussi le transport des polluants, par exemple en réduisant la dispersion des polluants et les effets canyons dans les rues (Salmond et al., 2013).

Élimination des particules

Les particules tombent ou sont emportées par le vent sur les feuilles/aiguilles, troncs, tiges et branches. Les particules se déposent ou sont attirées par électricité statique. Les inégalités sur la feuille, comme les surfaces rugueuses et les poils, accélèrent ces processus (impaction, adsorption).

Les conifères tels que les cèdres captent efficacement les particules, en raison de la structure des épines/aiguilles. Les particules restent agglomérées à la surface externe de l'arbre. Une partie des particules piégées est remise en suspension et une partie est éliminée lors des pluies. La capacité d'élimination dépend principalement des caractéristiques structurales des feuilles/aiguilles, de la vitesse de dépôt des particules et de la surface foliaire pour chaque espèce végétale.

Elimination des polluants gazeux

Les plantes sont capables d'absorber les composants gazeux à travers les stomates (les "pores") des feuilles au travers desquelles s'opère continuellement les échanges gazeux entre la feuille et l'air environnant (Fig. 8). Le NO_2 , l' O_3 et le CO_2 pénètrent principalement par les stomates (absorption). La **capacité d'élimination** des polluants atmosphériques est **spécifique à chaque espèce végétale** et dépend principalement de la surface foliaire et de la conductance stomatique (vitesse à laquelle la vapeur d'eau passe au travers les stomates). La dynamique des stomates (ouverture/fermeture) dépend du rayonnement solaire, de la température de l'air, de la teneur en eau du sol et du déficit de pression de vapeur.

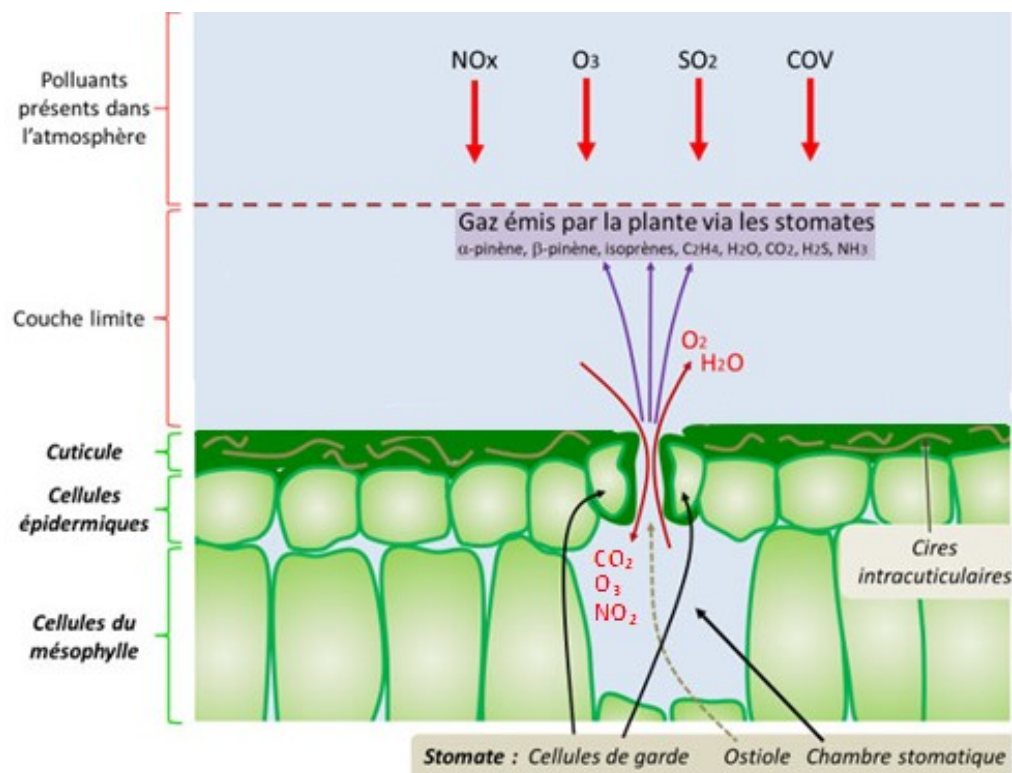


Figure 8 - Représentation schématique d'un stomate, situé à la surface des feuilles, où les échanges gazeux de la plante avec l'atmosphère s'effectuent. La taille des cellules est de l'ordre de 10 à 100 μm (modifiée de Garrec et al., 2019).

Afin de quantifier la capacité d'élimination des polluants, nous utilisons les données, présentées ci-dessus, mesurées aux stations sur une année. Manzini et al. (2023) proposent une formule pour estimer le flux de polluants atmosphériques (F , g arbre⁻¹ s⁻¹):

$$F_{\text{arbre}} = SF \times F_{\text{feuille}} \quad (1)$$

$$F_{\text{feuille}} = (1 - R) \times V_d \times C \quad (2)$$

$$V_d = 1 / (r_a + r_b + r_c) \quad (3)$$

$$r_a = 1 / (k \times u^*) \times \log \{ (z - d) / z_0 \} \quad (4)$$

où F_{feuille} est le flux de polluants atmosphériques par unité de surface foliaire (g m⁻² s⁻¹) ; SF est la surface foliaire (m²) estimée en multipliant l'indice de surface foliaire (LAI, m² m⁻²) par la surface de la cime (m²) ; R est le taux de remise en suspension ($R = 0$ pour O₃ et NO₂ ; $R = 0,5$ pour PM₁₀) ; V_d est la vitesse de dépôt pour chaque polluant (m s⁻¹) ; C est la concentration de polluants à la hauteur z ; r_a est la résistance aérodynamique (s m⁻¹) ; r_b est la résistance quasi-laminaire (s m⁻¹) ; r_c est la résistance de surface (s m⁻¹) ; k est la constante de von Karman (0,4) ; u^* est la vitesse de frottement (m s⁻¹) ; z_0 est la longueur de rugosité ($= 0,1 \times h$; h est la hauteur de l'arbre en m) et d est le déplacement du plan zéro ($= 0,7 \times h$, m). Les résistances r_b et r_c sont décrites dans les sections suivantes.

Particules PM₁₀

Pour calculer l'élimination des PM₁₀ par les arbres, Tiwary et al. (2009) ont appliqué une approche basée sur les vitesses de dépôt spécifiques à chaque espèce. Les résistances r_b et r_c ont été calculées comme suit :

$$r_b = B^{-1} \times (u^*)^{-1} \quad (5)$$

$$r_c = 1 / V_{g(s)} - (r_a + r_b) \quad (6)$$

$$V_{g(s)} = a \times \exp[b \times (U - 3)] \quad (7)$$

où $B^{-1} = 2 \times (2u^*)^{-1/3}$; $V_{g(s)}$ est la valeur de la vitesse de dépôt des particules pour chaque espèce végétale par unité de surface foliaire (m s⁻¹) ; U est la vitesse du vent (m s⁻¹) ; a est la $V_{g(s)}$ spécifique à l'espèce à une vitesse du vent de 3 m s⁻¹ ; b est un coefficient empirique déterminant la courbure de la relation entre $V_{g(s)}$ et U . Tous les paramètres spécifiques à chaque espèce ont été extraits de la littérature et regroupés dans Manzini et al. (2023).

Ozone et dioxyde d'azote

La résistance quasi-laminaire (r_b) a été calculée comme suggérée par Hicks et al. (1987).

$$r_b = 2 / (k \times u^*) \times (Sc/Pr)^{2/3} \quad (8)$$

$$r_c = 1 / (g_s / [D_{eau}/D_{gaz}] + g_{ext}) \quad (9)$$

$$g_s = g_{max} \times f_{light} \times \max \{f_{min}, (f_{temp} \times f_{VPD})\} \quad (10)$$

$$f_{light} = 1 / [1 + \{200 \times (G + 0,1)^{-1}\}^2] \quad (11)$$

$$f_{temp} = \{T \times (40 - T)\} / 400 \quad (12)$$

$$f_{VPD} = 1 - m \times \ln [VPD] \quad (13)$$

où Sc est le nombre de Schmidt (1,07 pour O_3 et NO_2); Pr est le nombre de Prandtl (0,72); g_s est la conductance stomatique spécifique à l'espèce; g_{ext} est la conductance cuticulaire (= 0,005 m s⁻¹); D_{eau}/D_{gaz} représente la différence de diffusivité de l'eau et du polluant gazeux étudié (= 1,6 pour O_3 et NO_2); g_{max} est la conductance stomatique maximale; f_{min} est la conductance stomatique minimale. Les fonctions f_{light} , f_{temp} et f_{VPD} dépendent respectivement du rayonnement solaire (G , W m⁻²), de la température de l'air (T , °C) et du déficit de pression de vapeur (VPD , kPa) et m désigne la sensibilité de la conductance stomatique à VPD (ln(kPa)⁻¹). Selon une étude réalisée par Hoshika et al. (2018), nous avons fixé m à 0,6. Tous les paramètres spécifiques à chaque espèce ont été extraits de la littérature et regroupés dans Manzini et al. (2023).

Le **potentiel de formation d' O_3** (g arbre⁻¹ jour⁻¹) a été calculé :

$$PFO = B[(E_{iso} R_{iso}) + (E_{mono} R_{mono})] \quad (14)$$

où B [(kg feuille verte) arbre⁻¹] est un facteur de biomasse pour une espèce cible avec $B = LMA \times SF$ où LMA est la masse foliaire par surface spécifique à l'espèce (kg m⁻²) extraite de Kleyer et al. (2008) regroupant environ 3000 espèces, et SF est la surface foliaire (m²). Les taux d'émission d'isoprène et de monoterpène E_{iso} et E_{mono} pour les différentes espèces ont été extraites de la littérature scientifique (Benjamin et Winer, 1998; Guenther *et al.*, 1995). R_{iso} et R_{mono} sont des facteurs de réactivité [(g O_3) (g bCOV)⁻¹] égaux à 9,1 pour l'isoprène et à 3,8 pour les monoterpènes (Carter, 1994). Pour chaque espèce végétale, la quantité d' O_3 éliminée ou formée (g arbre⁻¹ jour⁻¹) est estimée en soustrayant la quantité d' O_3 absorbée au travers les stomates au PFO (annexe 2).

Stockage et séquestration du CO_2

Le carbone stocké est déterminé en multipliant la biomasse des arbres en poids sec (DWB) par un coefficient de conversion de 0,50, puis par 3,67 afin de convertir le carbone en CO_2 (McPhearson and Simpson, 1999).

$$DWB_i = d \times t \times \rho_i \times V_i \quad (15)$$

où V_i (m^3) est le volume; ρ_i (kg m^{-3}) est la densité de bois; t (1,28) est le facteur de conversion de la biomasse totale pour inclure la biomasse souterraine sur la base du rapport racine/tige moyen; d est une constante (= 0,48 pour les espèces à feuillage persistant et de 0,56 pour les espèces à feuilles caduques). Pour calculer le volume, nous avons utilisé la formule allométrique suivante proposée par Burkhardt et Tomé (2012) :

$$V_i = b_0 + b_1(\text{DBH})^2 h \quad (16)$$

où les coefficients b_0 et b_1 sont fixés à 0,00626 et 0,00003666. DBH est le diamètre de l'arbre à hauteur de poitrine, tandis que h est la hauteur de l'arbre (m).

Classement des espèces végétales

Afin de comparer la capacité de chaque espèce végétale à éliminer les polluants atmosphériques, une note de 1, 2, et 3 a été attribuée lorsque la valeur d'élimination (en g par jour pour un arbre adulte) est respectivement $\leq$ au 25^e centile (pas ou peu efficace), entre le 25^e et le 75^e centile (modérément efficace) et $\geq$ au 75^e centile (efficace) calculé sur l'ensemble des 220 espèces végétales étudiées (Sicard et al., 2018). Pour chaque espèce végétale, un score final a été obtenu en additionnant les scores individuels pour chaque polluant, de sorte qu'un score > 10 signifie une capacité d'élimination élevée (**espèce végétale "recommandée"**) et un score < 3 signifie une faible capacité d'élimination (**espèce végétale "non recommandée"**).

2.6. Mission terrain

L'objectif des missions a été la construction d'une base de données de vérité terrain contenant la hauteur des arbres et leurs espèces avec un total de 400 arbres étudiés afin de valider nos résultats. Afin de garantir la plus grande diversité d'espèces et de bien organiser la mission de terrain, un itinéraire a été défini au préalable. Cet itinéraire a été importé dans l'application mobile QGIS (Qgis Field) afin de rapporter en temps réel les mesures prises au sol.

Pour les mesures, nous avons procédé comme suit :

Pour la hauteur : Le Vertex IV est un instrument de mesure de haute qualité pour mesurer un nombre illimité de hauteurs par objet. L'instrument travaille avec la technologie de mesure par ultrasons qui fonctionne aussi quand l'objet que nous considérons n'est pas visible en partie ou totalement. La hauteur est calculée selon un principe trigonométrique en utilisant les mesures d'une distance et de deux angles. Le Vertex suppose automatiquement que l'objet à mesurer est perpendiculairement disposé au sol. Les données sur les hauteurs, l'angle et la distance horizontale peuvent être transférés par Bluetooth.

Pour la **détermination des espèces**: nous nous sommes appuyés sur les connaissances de l'équipe à l'aide d'une application d'identification des plantes appelée PlantNet.



Figure 9 – Les points en rouge représentent les 400 relevés effectués à Bucarest en 2024 (gauche) pour l'identification de la hauteur des arbres, et la détermination de l'espèce végétale.

3. Résultats

Le démonstrateur prend la forme d'une interface permettant de visualiser les données et indicateurs produits dans le cadre du projet **SCO GreenSpace** et également avec d'autres données open source. L'objectif est de donner accès aux municipalités à l'ensemble des données produites dans le cadre du projet. L'explorateur permet de visualiser la cartographie de la végétation arborée, et permet de superposer à ces cartes d'autres informations relatives au contexte urbain (voirie, etc.) ou d'afficher l'image satellite THR utilisée pour la détection ainsi que le modèle de hauteur de canopée. Un panneau s'affiche à droite lorsqu'on clique sur un arbre pour obtenir des informations détaillées : identifiant de l'arbre, espèce végétale, localisation (latitude, longitude), hauteur, et sa capacité d'élimination des polluants.



Figure 10 - L'explorateur permet de visualiser la végétation arborée ainsi que les attributs de chacun des arbres publics et privés.

3.1. Ville pilote: Valencia

Valence est la troisième ville la plus peuplée d'Espagne avec environ 837 000 habitants. Située sur la côte méditerranéenne, la ville bénéficie d'un **climat méditerranéen**. Concernant la qualité de l'air, la ville affiche généralement un indice modéré. Les concentrations en O₃ et particules fines (PM_{2.5}) excèdent régulièrement les seuils de recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (15 µg m⁻³ sur 24-h pour PM_{2.5} ; 100 µg m⁻³ sur 8-h pour O₃). La ville s'est vu décerner le titre de *European Green Capital Award 2024*, en reconnaissance de ses efforts en matière d'espaces verts, de mobilité douce et de durabilité.

La ville compte plus de 1,254 hectares de parcs et espaces verts municipaux, ce qui correspond à environ **15,5 m² d'espaces verts** par habitant, un niveau supérieur à la recommandation de l'Organisation Mondiale de la Santé de 10-15 m² par habitant pour les villes. Le *Jardín del Turia* - un ancien lit de rivière transformé en vaste parc urbain long de plusieurs kilomètres – est aujourd'hui l'un des plus grands jardins urbains d'Europe.

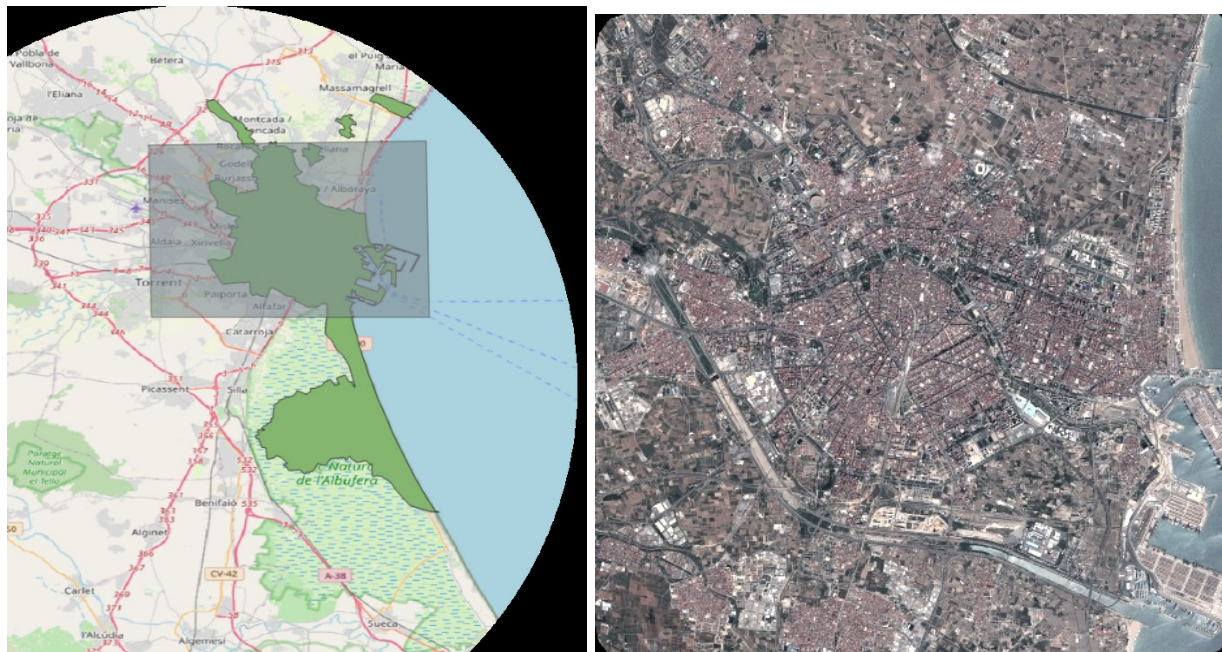


Figure 11 – Zone d'étude centrée sur le cœur de ville de Valencia (56 km²). Images satellite Pléiades acquise le 07 juin 2022 à Valencia (126 km², droite).

Détection et classification des arbres à Valencia

Sur la zone d'étude (56 km², soit 41.2 % de la surface totale de la ville), nous avons détecté et classé **146 445 arbres** dans les zones publiques et privées et **352 espèces** différentes (Annex 1). À Valencia, les espèces d'arbres les plus communes sont: *Citrus x aurantium* (11 832 arbres), *Platanus x hispanica* (10 591 arbres), *Melia azedarach* (7 795 arbres), *Celtis australis* (7 166 arbres) et *Washingtonia robusta* (6 195 arbres). La précision globale pour la classification des espèces d'arbres est d'environ 88 %, avec un coefficient Kappa = 0,85.

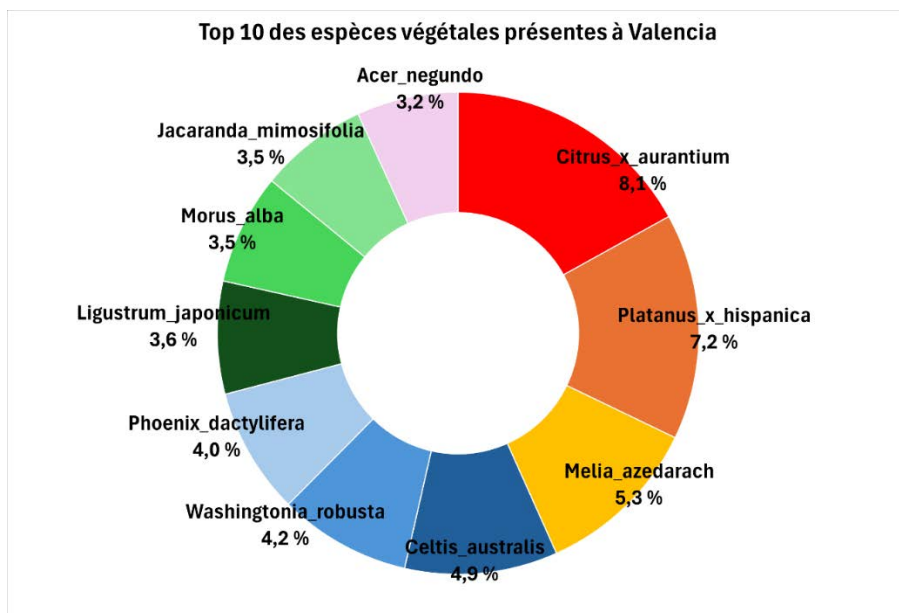


Figure 12 – Espèces végétales les plus présentes à Valencia (Bigaradier, Platane commun, Lila de perse, Palmier de Washington, et Micocoulier).



Figure 13 – Localisation des 146 445 arbres dans les zones publiques et privées de Valencia en 2022. Chaque espèce végétale est identifiée par un ID et un code couleur.

Hauteur des arbres à Valencia

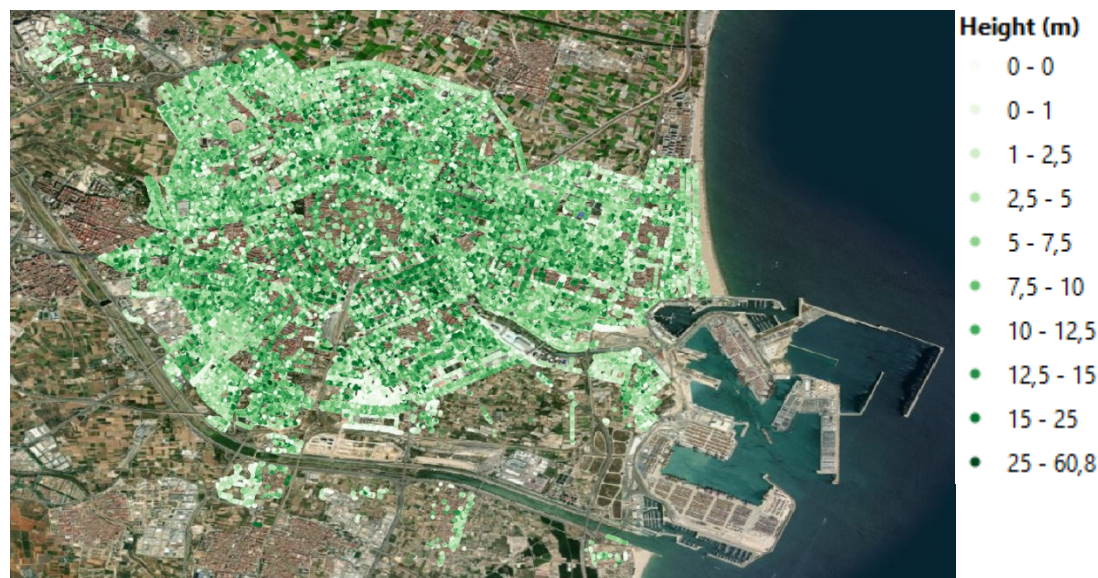


Figure 14 – Détection et estimation de la hauteur des arbres sur la zone d'étude à Valencia.

Élimination des polluants gazeux (NO₂ et O₃) et particulaires PM₁₀

Les grands conifères tels que *Pseudotsuga menziesii* (31,31 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Cedrus libani* (22,10 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont une capacité d'élimination du NO₂ élevée (Annexe 2), suivis des arbres et arbustes à grandes feuilles telles que *Fraxinus*, *Fagus*, *Liriodendron*, *Tilia*, *Quercus*, *Platanus* et *Eucalyptus*. Parmi eux, *Fraxinus excelsior* et *Fagus sylvatica* ont la meilleure performance avec plus de 19 g arbre⁻¹ jour⁻¹ de NO₂ éliminés quotidiennement.

Fraxinus excelsior (26,05 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Fagus sylvatica* (24,76 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont une grande capacité à éliminer l'O₃ et sont caractérisés par un faible potentiel de formation d'ozone (PFO). *Tilia platyphyllos* (23,42 g arbre⁻¹ jour⁻¹), *Tilia cordata* (22,48 g arbre⁻¹ jour⁻¹), *Tilia x europaea* (17,35 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Aesculus hippocastanum* (13,20 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont aussi une grande capacité d'élimination de l'O₃ grâce à un PFO nul. A l'inverse, les espèces végétales qui forment le plus d'O₃ sont les *Eucalyptus*, *Populus*, *Liquidambar*, *Quercus*, *Salix*, *Phoenix*, et *Robinia*. En particulier, l'*Eucalyptus globulus* forme plus d'O₃ (428,93 g arbre⁻¹ jour⁻¹) que ce qu'il élimine (17,43 g arbre⁻¹ jour⁻¹).

Les conifères ont la meilleure capacité d'élimination des PM₁₀ tels que le *Pseudotsuga menziesii* (12,63 g arbre⁻¹ jour⁻¹), *Cedrus libani* (9,56 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et le *Picea abies* (6,31 g arbre⁻¹ jour⁻¹). Les arbres à grandes feuilles, tels que le *Fagus sylvatica* (4,80 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et les *Quercus* (2,16-3,13 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont une capacité à éliminer les PM₁₀ élevée.

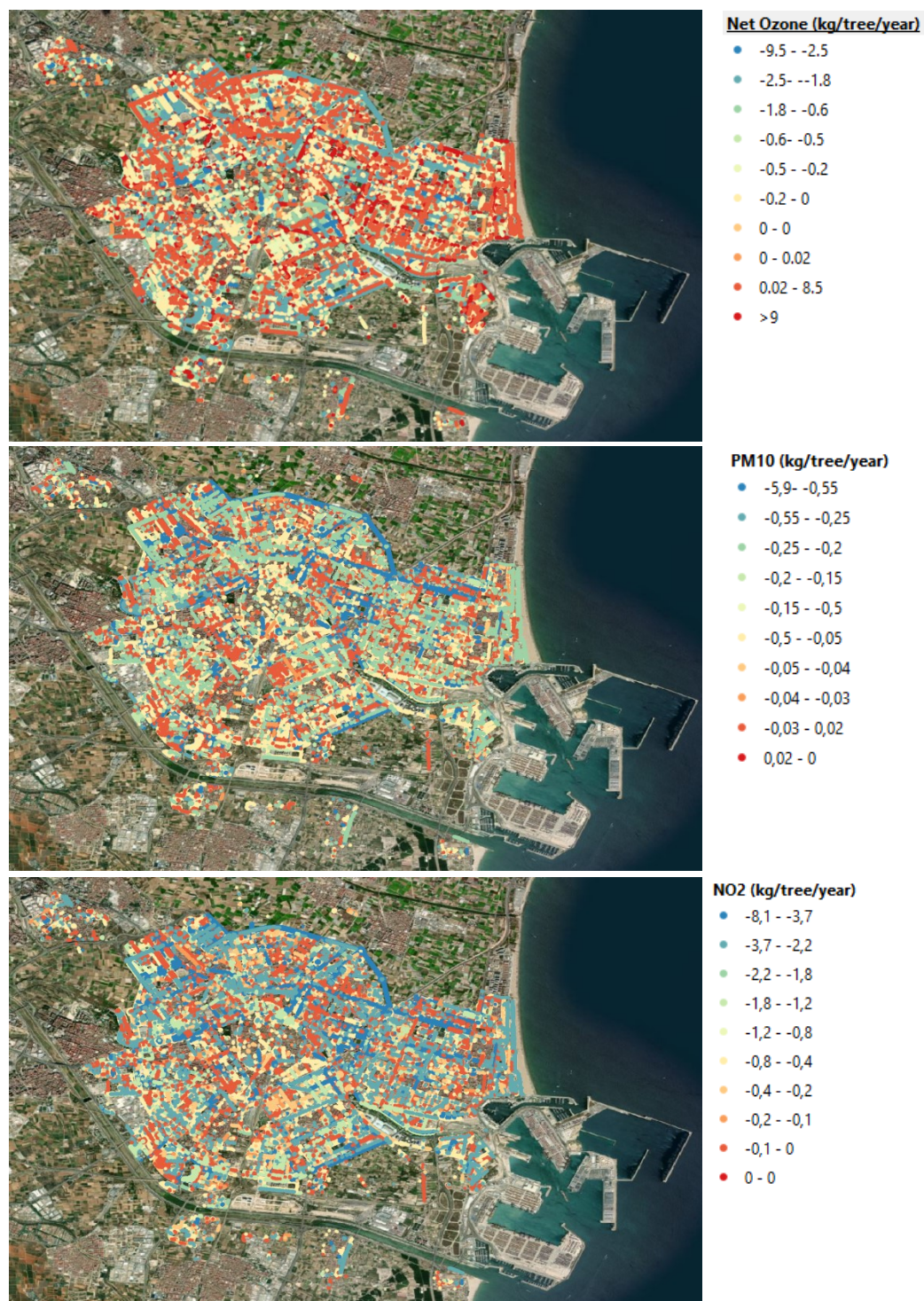


Figure 15 – Répartition spatiale des quantités d'ozone (haut), de PM₁₀ (milieu) et de NO₂ (bas) éliminées par les arbres individuels (kg par arbre par an) à Valencia pour l'année 2022.

Stockage et séquestration du CO₂

Quercus palustris et *Fagus sylvatica* ont éliminé plus de 100 kg an⁻¹ de CO₂ stockant respectivement 5,01 et 5,38 tonnes de CO₂. Parmi les conifères, seul *Pinus canariensis* figure parmi les dix premières espèces absorbant 88,47 kg an⁻¹ de CO₂. Les arbustes tels que *Lagerstroemia indica* et *Acer japonicum* ont une faible capacité de stockage et de séquestration du CO₂ en éliminant moins de 10 kg an⁻¹ de CO₂. Cependant, des arbres fruitiers tels que *Malus communis*, *Pyrus communis*, *Prunus cerasifera* et *Olea europaea* montrent une faible capacité de séquestration du CO₂ avec des valeurs de 11-15 kg arbre⁻¹ an⁻¹.

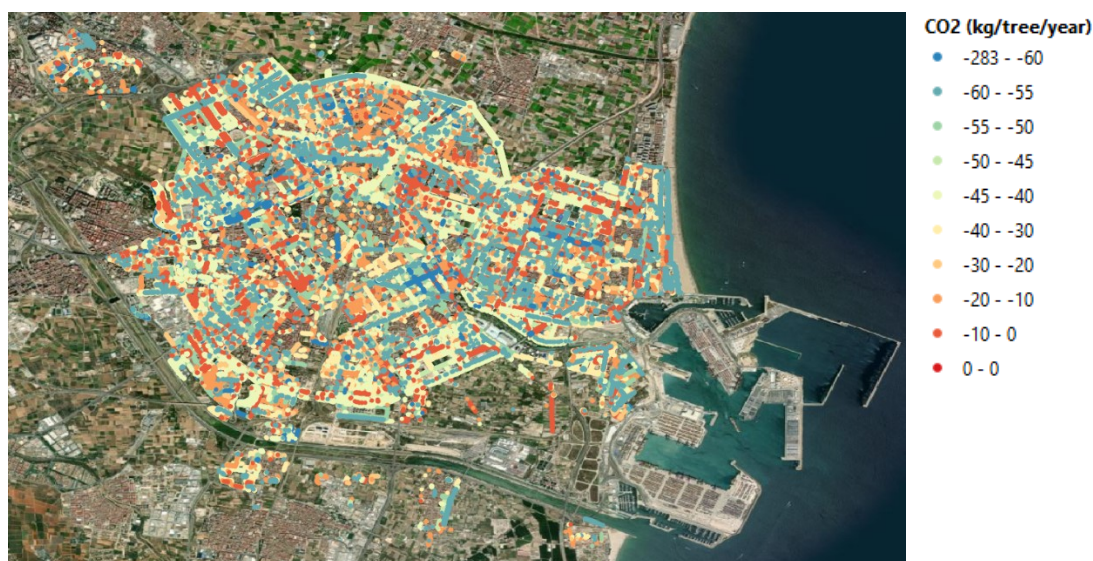


Figure 16 – Répartition spatiale des quantités de CO₂ éliminées par les arbres individuels (kg par arbre par an) à Valencia pour l'année 2022.

Impact du patrimoine arboré de Valencia sur la qualité de l'air

À Valencia, les **146 445 arbres adultes ont éliminé en 2022**: 196,9 tonnes NO₂ (46 100 voitures¹), 37,3 tonnes PM₁₀ (56 160 voitures¹), 5 428 tonnes CO₂ (3 420 voitures¹). Les 146 445 arbres ont augmenté la charge d'O₃ dans l'air de 225,4 tonnes en 2022 (formation : 336 tonnes, élimination ; 111 tonnes). Certaines espèces forment plus d'O₃ que ceux qu'elles éliminent: *Phoenix* spp. (+ 132,2 t/an), *Populus* spp. (+ 63,3 t/an), *Washingtonia* spp. (+ 57,6 t/an), *Quercus* spp. (+ 53,7 t/an), et *Eucalyptus* spp. (+ 15,6 t/an). Les platanes ont permis d'éliminer 12% de la quantité totale d'O₃ et les pins ont permis d'éliminer 43% de la quantité totale de PM₁₀ (Tab. 4).

Selon un inventaire des émissions de gaz à effet de serre de la ville, les émissions totales de CO₂ pour Valencia s'élèvent à ≈ 2 234 962 tonnes de CO₂-équivalent. La répartition des émissions

¹ émissions moyennes des voitures particulières immatriculées en France ayant parcouru en moyenne 12 200 km au cours de l'année à une vitesse moyenne de 70 km/h.

montre que le transport privé et commercial (véhicules, usage domestique, etc.) est le secteur le plus émetteur : il concentre environ 71 % des émissions de la ville. Les 146 445 arbres adultes ont éliminé 5 428 tonnes de CO₂ par an de l'air ambiant, soit environ 0,2% des émissions locales de CO₂.

Tableau 4 – Top 10 des espèces végétales les plus efficaces dans l'élimination des polluants.

Genre	% élimination O ₃	Genre	% élimination NO ₂	Genre	% élimination PM ₁₀	Genre	% élimination CO ₂
<i>Platanus</i>	11,6	<i>Platanus</i>	32,9	<i>Pinus</i>	43,2	<i>Acer</i>	9,6
<i>Acer</i>	6,6	<i>Phoenix</i>	9,6	<i>Platanus</i>	16,5	<i>Phoenix</i>	8,8
<i>Fraxinus</i>	6,3	<i>Washingtonia</i>	8,5	<i>Acer</i>	4,9	<i>Platanus</i>	8,2
<i>Celtis</i>	6,1	<i>Acer</i>	5,9	<i>Phoenix</i>	4,8	<i>Washingtonia</i>	7,8
<i>Tilia</i>	3,3	<i>Fraxinus</i>	5,5	<i>Washingtonia</i>	4,2	<i>Melia</i>	7,5
<i>Melia</i>	2,1	<i>Celtis</i>	5,3	<i>Quercus</i>	4,1	<i>Pinus</i>	7,4
<i>Ulmus</i>	2,0	<i>Quercus</i>	4,4	<i>Celtis</i>	3,0	<i>Celtis</i>	6,2
<i>Morus</i>	1,6	<i>Pinus</i>	4,2	<i>Citrus</i>	2,1	<i>Citrus</i>	4,4
<i>Pinus</i>	1,5	<i>Populus</i>	3,4	<i>Populus</i>	1,7	<i>Cupressus</i>	4,1
<i>Jacaranda</i>	1,4	<i>Tilia</i>	2,8	<i>Tilia</i>	1,5	<i>Morus</i>	3,6

3.2. Ville pilote: Bucarest

Bucarest est la capitale de la Roumanie, avec environ 1,88 million d'habitants. La ville bénéficie d'un climat continental, avec des étés chauds - les températures peuvent dépasser 30-35 °C - et des hivers froids, avec des minima autour de -1 °C en moyenne. En 2025, la pollution - dominée par les particules fines PM_{2.5} - place fréquemment Bucarest parmi les grandes villes les plus polluées. Les principales sources sont le trafic routier (60 % des émissions) et le chauffage urbain (notamment les centrales thermiques). Concernant les espaces verts, la ville compte moins de 10 m² d'espaces verts publics par habitant. On estime qu'il y a en moyenne seulement 0,88 arbre par résident. Parmi les principaux espaces verts urbains figurent le parc historique *Cișmigiu Gardens*, le *Parc Tineretului*, le *Parcul Izvor* et le jardin botanique *Bucharest Botanical Garden*.

La municipalité a souhaité focaliser l'étude sur 4 zones spécifiques (Fig. 18) afin d'établir un inventaire partiel et valider l'approche sans inventaire municipal initial.

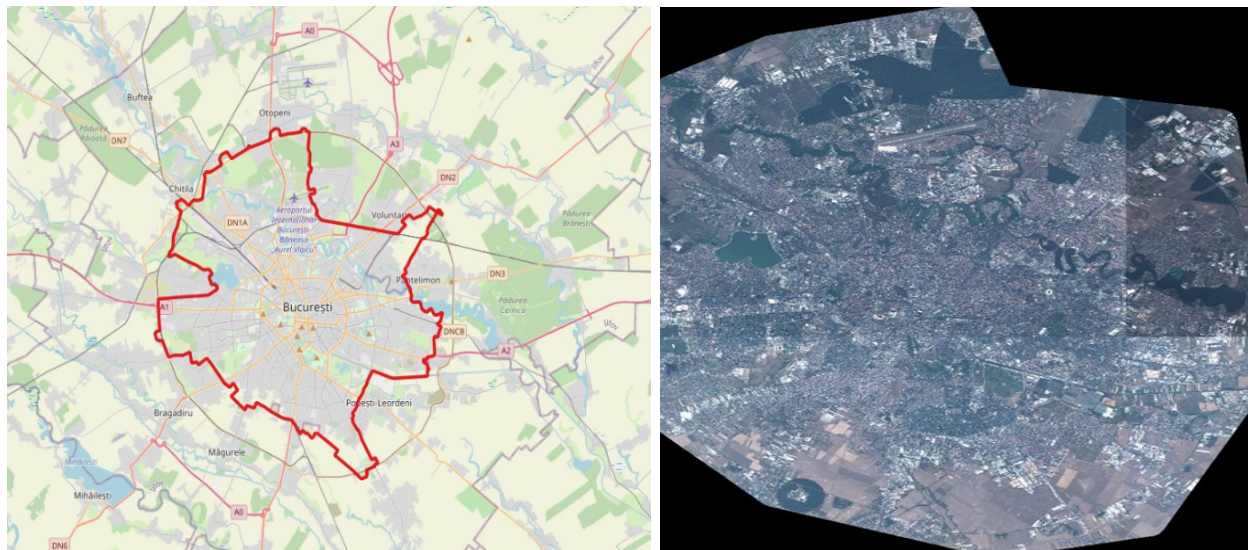


Figure 17 – Zone d'étude à Bucarest (350 km²). Images satellite Pléiades acquise le 23 septembre 2024 à Bucharest (droite)



Figure 18 – Les 4 zones d'étude à Bucarest (67km² sur 350 km²). Images satellite Pléiades acquise le 23 septembre 2024.

Détection et classification des arbres à Bucarest

Sur les 4 zones d'étude (68 km², soit environ 20% de la surface totale de la ville de 350km²), nous avons détecté et classé **370 866 arbres** dans les zones publiques et privées. Dans ces zones, les espèces d'arbres les plus communes sont: *Platanus x acerifolia* (14,9%), *Fraxinus excelsior* (14,6%), *Tilia cordata* (11,7%) et *Quercus rubra* (9,8%).

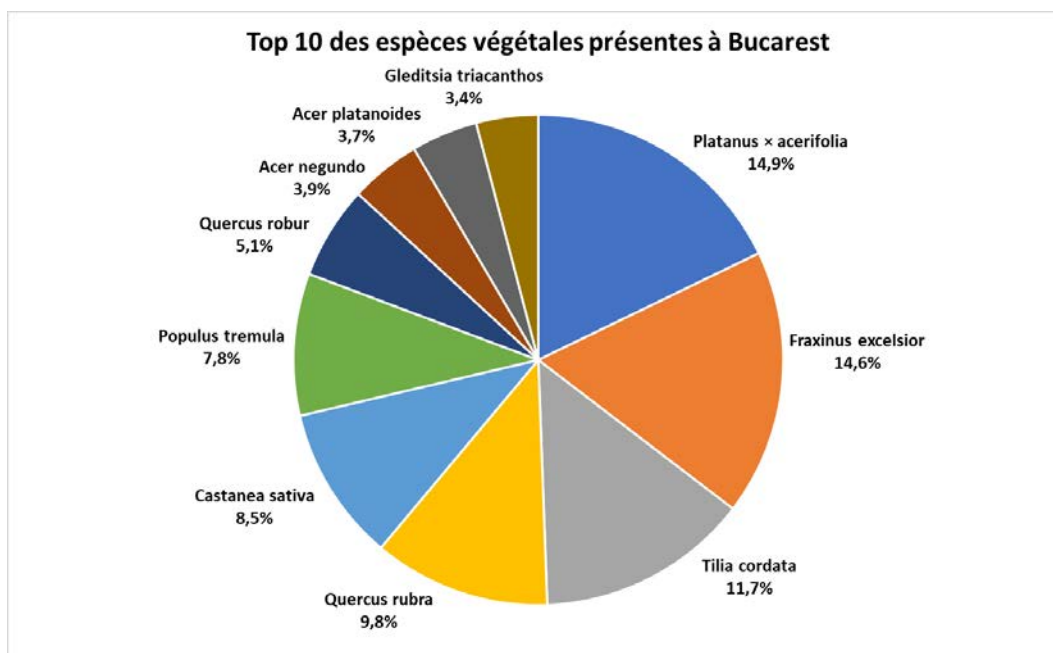


Figure 19 – Espèces végétales les plus présentes à Bucarest (Platane commun, Frêne élevé, Tilleul à petites feuilles, Chêne rouge d'Amérique et Châtaignier).

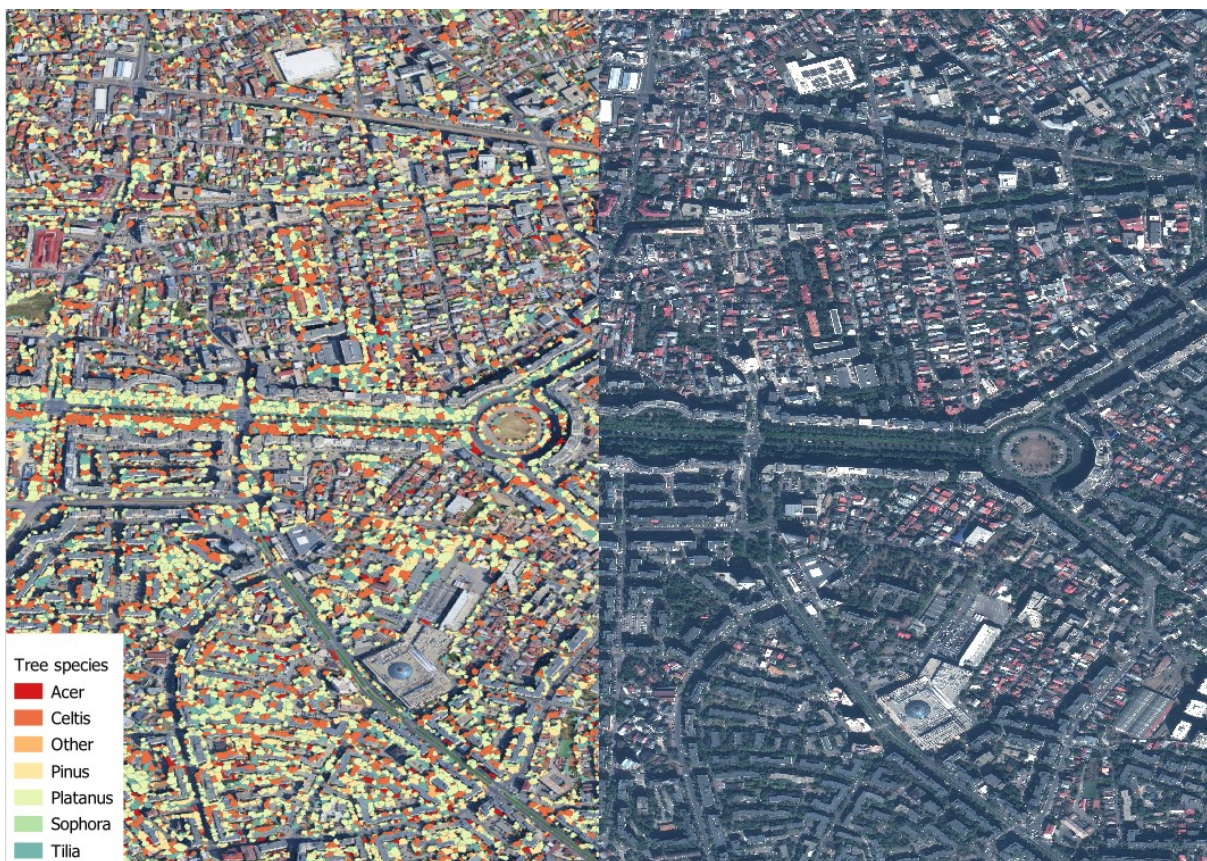


Figure 20 – Localisation des canopées des arbres dans les zones publiques et privées de Bucarest en 2024 (zoom sur une zone dans le sud-ouest de Bucarest). Chaque espèce végétale est identifiée par un ID et un code couleur.

Hauteur des arbres à Bucarest

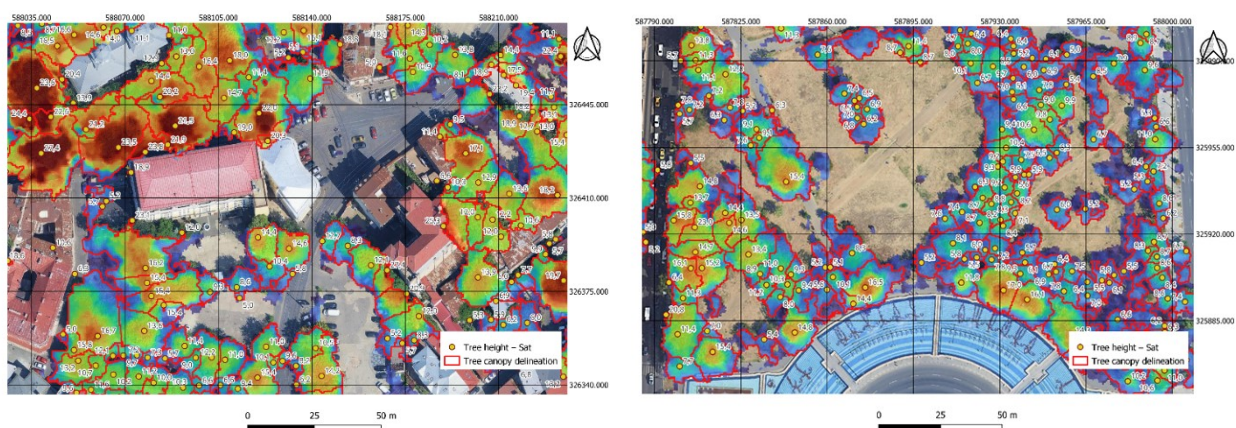


Figure 21 – Détection et estimation de la hauteur des arbres sur une zone d'étude à Bucarest.

Grâce aux données issues de la mission sur le terrain, une analyse a été menée afin de valider la hauteur estimée des arbres. Les résultats de la corrélation indiquent un taux d'environ 92 %, et une différence hauteur observée vs estimée inférieure de 10%.

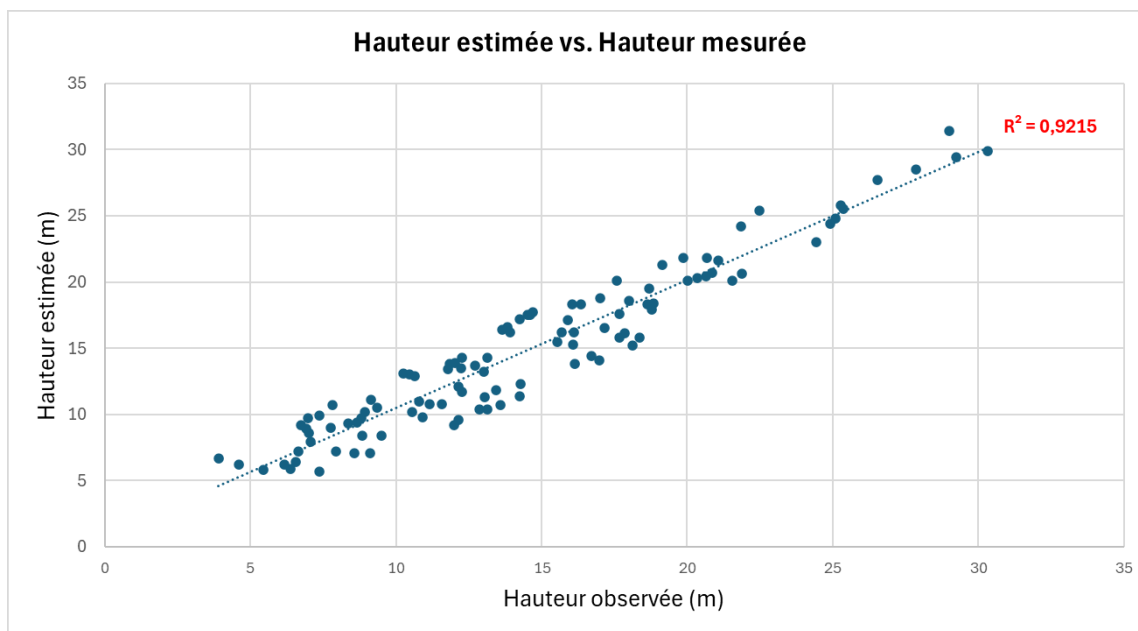


Figure 22 – Corrélation obtenue entre la hauteur estimée par tri-stéréoscopie et la hauteur mesurée des arbres sur une zone d'étude à Bucarest (4 zones, 400 arbres).

Élimination des polluants gazeux (NO₂ et O₃) et particulaires PM₁₀

Pseudotsuga menziesii (9,18 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Fagus sylvatica* (3,75 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont une capacité d'élimination du NO₂ élevée (Annexe 3), suivis des arbres et arbustes à grandes feuilles telles que *Fraxinus*, *Liriodendron*, *Tilia*, *Platanus* et *Picea* avec 3-4 g de NO₂ éliminés par arbre quotidiennement. Les conifères ont la meilleure capacité d'élimination des PM₁₀ tels que le *Pseudotsuga menziesii* (11,17 g arbre⁻¹ jour⁻¹), *Picea abies* (5,53 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Cedrus atlantica* (3,54 g arbre⁻¹ jour⁻¹). *Fraxinus excelsior* (10,60 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Fagus sylvatica* (9,84 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont une grande capacité à éliminer l'O₃ et sont caractérisés par un faible PFO. *Tilia platyphyllos* (9,76 g arbre⁻¹ jour⁻¹), *Tilia cordata* (9,22 g arbre⁻¹ jour⁻¹), *Tilia x europaea* (7,21 g arbre⁻¹ jour⁻¹) et *Acer platanoides* (7,31 g arbre⁻¹ jour⁻¹) ont aussi une grande capacité d'élimination de l'O₃ grâce à un PFO nul ou faible. A l'inverse, les espèces végétales qui forment le plus d'O₃ sont les *Populus*, *Quercus*, et *Salix*. En particulier, *Quercus robur* forme plus d'O₃ (100,80 g arbre⁻¹ jour⁻¹) que ce qu'il élimine (5,69 g arbre⁻¹ jour⁻¹).

Impact du patrimoine arboré de Bucarest sur la qualité de l'air

Dans les 4 zones spécifiques (67 km²), les **370 866 arbres adultes ont éliminé en 2024**: 171 tonnes NO₂ (40 100 voitures²), 94 tonnes PM₁₀ (142 530 voitures¹) et 236 tonnes d'O₃. Les tilleuls (80 811 arbres) et les érables (33 120 arbres) ont permis d'éliminer respectivement 159 tonnes et 52 tonnes d'O₃. Les platanes (84 106 arbres) ont éliminé 60 tonnes de NO₂ et 24 tonnes de PM₁₀ mais ont ajouté dans l'atmosphère 34 tonnes d'O₃.

3.3. Classement des espèces végétales

Quelles espèces végétales pour réduire la pollution de l'air ?

En ville, pour réduire efficacement les niveaux d'O₃ il faut réduire légèrement les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) et réduire drastiquement les émissions de Composés Organiques Volatils dont ceux émis par la végétation (COV biogéniques). Afin d'éviter une **aggravation** de l'augmentation des niveaux d'O₃ en ville, **il faut sélectionner des essences non émettrices de COV biogéniques** tels que l'isoprène et les monoterpènes. Selon notre classement (Annexe 2), les espèces suivantes ont obtenu le score *maximal*: *Acer pseudoplatanus*, *Acer platanoides*, *Fagus sylvatica*, *Pseudotsuga menziesii*, *Quercus cerris*, *Quercus palustris*, *Tilia platyphyllos*, *Tilia x europaea*, et *Tilia cordata*.

Tableau 5 - Liste des espèces végétales, précédemment citées, en termes d'élimination des principaux polluants de l'air et gaz à effet de serre - Ozone (O₃), dioxyde d'azote (NO₂), particules (PM₁₀), dioxyde de carbone (CO₂): pas ou peu efficace (rouge), modérément efficace (orange) et efficace (vert). Les espèces en gras sont des essences subtropicales présentes à Valencia adaptées au changement climatique.

Taxon	Nom commun	O ₃	NO ₂	PM ₁₀	CO ₂
<i>Acer campestre</i>	Érable champêtre	vert	orange	orange	orange
<i>Acer x freemanii</i>	Érable de Freeman	vert	vert	vert	vert
<i>Acer monspessulanum</i>	Érable de Montpellier	vert	orange	orange	rouge
<i>Acer platanoides</i>	Érable plane	vert	vert	vert	vert
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore	vert	vert	vert	vert
<i>Acer Rubrum</i>	Érable rouge	vert	orange	orange	vert
<i>Aesculus hippocastanum</i>	Marronnier d'Inde	vert	vert	orange	vert
<i>Carpinus betulus</i>	Charme commun	vert	vert	orange	vert
<i>Castanea sativa</i>	Châtaignier commun	vert	vert	orange	vert
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Pin australien	rouge	orange	orange	vert
<i>Cedrus atlantica & libani</i>	Cèdre de l'Atlas & du Liban	vert	vert	vert	orange

² émissions moyennes des voitures particulières immatriculées en France ayant parcouru en moyenne 12 200 km au cours de l'année à une vitesse moyenne de 70 km/h.

<i>Celtis australis</i>	Micocoulier de Provence				
<i>Chitalpa tashkentensis</i>	Chitalpa de Tashkent				
<i>Cinnamomum camphora</i>	Camphrier				
<i>Corylus colurna</i>	Noisetier de Byzance				
<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre commun				
<i>Firmiana simplex</i>	Parasol chinois				
<i>Fraxinus angustifolia</i>	Frêne à feuilles étroites				
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun				
<i>Ginkgo biloba</i>	Ginkgo (mâle, sans fruits)				
<i>Gleditsia triacanthos 'Sunburst'</i>	Févier d'Amérique doré				
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Flamboyant bleu				
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier de Virginie				
<i>Magnolia grandiflora</i>	Magnolia à grandes fleurs				
<i>Morus alba 'Fruitless'</i>	Mûrier blanc stérile				
<i>Platanus x acerifolia</i>	Platane commun				
<i>Platanus orientalis</i>	Platane d'Orient				
<i>Prunus avium</i>	Merisier				
<i>Pyrus calleryana</i>	Poirier de Chine				
<i>Quercus cerris</i>	Chêne chevelu				
<i>Quercus palustris</i>	Chêne des marais				
<i>Sophora japonica</i>	Sophora du Japon				
<i>Tilia americana</i>	Tilleul américain				
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles				
<i>Tilia x europaea</i>	Tilleul commun				
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilleul à grandes feuilles				
<i>Tilia tomentosa</i>	Tilleul argenté				
<i>Tipuana tipu</i>	Tipuana tipu				
<i>Ulmus americana</i>	Orme d'Amérique				
<i>Ulmus 'Columella'</i>	Orme 'Columella'				
<i>Ulmus glabra Huds.</i>	Orme des montagnes				
<i>Ulmus minor Mill.</i>	Orme champêtre				
<i>Ulmus 'Sapporo Autumn Gold'</i>	Orme Résistant Sapporo Gold				
<i>Zelkova serrata</i>	Zelkova du Japon				

Quelles espèces végétales face au réchauffement climatique ?

Dans un contexte de changement climatique et face à la hausse des températures, principalement en été, il faut sélectionner des essences résistantes aux sécheresses de plus en plus longues, à la chaleur, au fort rayonnement solaire et aux ravageurs et maladies. Une remontée progressive des aires de répartition végétale vers le nord est observée. Cela permet d'installer des espèces endémiques des climats secs, qui ont développé des stratégies face à la sécheresse.

De ce fait, nous avons étudié environ **300 espèces végétales endogènes et exogènes**, parmi lesquelles des **essences subtropicales** que nous retrouvons dans les rues et les parcs de Valencia (Espagne).

Tableau 6 - Liste d'espèces végétales **résilientes au changement climatique** (par exemple, résistance à la sécheresse et à l'augmentation de la température de l'air) **et leur impact sur la qualité de l'air**: pas ou peu efficace (rouge), modérément efficace (orange) et efficace (vert). Les espèces en gras sont des essences subtropicales présentes à Valencia adaptées au changement climatique.

Taxon	Nom commun	Qualité de l'air
<i>Acer freemanii</i>	Érable de Freeman	Vert
<i>Acer monspessulanum</i>	Érable de Montpellier	Orange
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore	Vert
<i>Acer Rubrum</i>	Érable rouge	Vert
<i>Brachychiton populneus</i>	Kurrajong	Orange
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Pin australien	Rouge
<i>Cedrus atlantica</i>	Cèdre de l'Atlas	Vert
<i>Celtis australis</i>	Micocoulier de Provence	Vert
<i>Celtis sinensis</i>	Micocoulier de Chine	Vert
<i>Chitalpa tashkentensis</i>	Chitalpa de Tashkent	Vert
<i>Firmiana simplex</i>	Parasol chinois	Vert
<i>Gleditsia triacanthos 'Sunburst'</i>	Févier d'Amérique doré	Vert
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Flamboyant bleu	Orange
<i>Koelreuteria paniculata</i>	Savonnier	Rouge
<i>Lagerstroemia indica</i>	Lilas d'été	Vert
<i>Melia azedarach</i>	Lilas de Perse	Orange
<i>Morus alba 'Fruitless'</i>	Mûrier blanc stérile	Orange
<i>Pistacia chinensis</i>	Pistachier de Chine	Orange
<i>Prunus avium</i>	Merisier	Vert
<i>Pterocarya fraxinifolia</i>	Ptérocaryer du Caucase	Vert
<i>Quercus acutissima</i>	Chêne du Japon	Orange
<i>Quercus cerris</i>	Chêne chevelu	Vert
<i>Salix caprea</i>	Saule marsault	Rouge
<i>Sophora japonica</i>	Sophora du Japon	Vert
<i>Tamarix gallica</i>	Tamaris commun	Vert
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	Vert
<i>Tipuana tipu</i>	Tipuana tipu	Orange
<i>Ulmus 'Sapporo Autumn Gold'</i>	Orme Résistant Sapporo Gold	Vert
<i>Zelkova serrata</i>	Zelkova du Japon	Vert

Quelles espèces végétales pour réduire les îlots de chaleur urbains ?

La végétation joue donc un rôle essentiel de protection contre la chaleur grâce au phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage direct au sol ou sur les bâtiments. Ainsi, nous pouvons ressentir et observer des différences de températures de l'air de l'ordre de 3 à 5 °C dans un rayon de 3 m à un instant t . La création d'un parc au centre-ville en remplacement de bâtiments générerait une baisse de température de l'air environnant de 2 °C à plus de 6 °C (Dimoudi et Nikolopoulou, 2003).

Les arbres à croissance rapide, avec une grande densité foliaire et un houppier assez haut sont plus efficaces dans la réduction des îlots de chaleur urbains (Rahman et al., 2020). Des études ont montré qu'une augmentation de 10% de la couverture foliaire par les arbres engendre une baisse en moyenne de 1°C de la température de l'air. Les feuilles des arbres empêchent les rayons du soleil de passer et projettent de l'ombre sur le sol et les surfaces environnantes. Par exemple, une différence de plus de 10°C peut exister entre une façade ensoleillée et la même façade ombragée.

L'arbre rafraîchit l'air ambiant par **évapotranspiration**: en pratique, l'arbre prélève de l'eau dans le sol (jusqu'à 450 litres par jour pour un arbre adulte) et la rejette dans l'air sous forme de vapeur d'eau (95% est transpirée et 5% est stockée). Les stomates sont les principaux régulateurs de l'évapotranspiration. La dynamique des stomates varie d'une essence à une autre, mais aussi en fonction de paramètres environnementaux tels que l'état hydrique du sol. Il faut donc un accès à l'eau le plus régulier possible pour permettre à l'arbre de ne pas entrer en fonctionnement de protection et réduire le niveau d'évapotranspiration.

Tableau 7 - Liste des meilleures espèces végétales en termes d'atténuation des îlots de chaleur urbains et leur impact sur la qualité de l'air: pas ou peu efficace (rouge), modérément efficace (orange) et efficace (vert). Les espèces en gras sont des essences subtropicales présentes à Valencia adaptées au changement climatique.

Taxon	Nom commun	Qualité de l'air
<i>Acer pseudoplatanus</i>	Érable sycomore	
<i>Aesculus x carnea</i>	Marronnier à fleurs rouges	
<i>Aesculus hippocastanum</i>	Marronnier d'Inde	
<i>Brachychiton populneus</i>	Kurrajong	
<i>Castanea sativa</i>	Châtaignier commun	
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	Pin australien	
<i>Celtis australis</i>	Micocoulier de Provence	
<i>Corylus avellana</i>	Noisetier commun	
<i>Corylus colurna</i>	Noisetier de Byzance	
<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre commun	
<i>Firmiana simplex</i>	Parasol chinois	

<i>Fraxinus angustifolia</i>	Frêne à feuilles étroites	
<i>Fraxinus excelsior</i>	Frêne commun	
<i>Ginkgo biloba</i>	Ginkgo	
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Copalme d'Amérique	
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier de Virginie	
<i>Magnolia grandiflora</i>	Magnolia à grandes fleurs	
<i>Morus alba 'Fruitless'</i>	Mûrier blanc stérile	
<i>Platanus x acerifolia</i>	Platane commun	
<i>Platanus orientalis</i>	Platane d'Orient	
<i>Prunus avium</i>	Merisier	
<i>Pterocarya fraxinifolia</i>	Ptérocaryer du Caucase	
<i>Quercus acutissima</i>	Chêne du Japon	
<i>Quercus cerris</i>	Chêne chevelu	
<i>Quercus petraea</i> Lieblein	Chêne sessile	
<i>Sophora japonica</i>	Sophora du Japon	
<i>Tilia americana</i>	Tilleul américain	
<i>Tilia cordata</i>	Tilleul à petites feuilles	
<i>Tilia x europaea</i>	Tilleul commun	
<i>Tilia platyphyllos</i>	Tilleul à grandes feuilles	
<i>Tilia tomentosa</i>	Tilleul argenté	
<i>Ulmus americana</i>	Orme d'Amérique	
<i>Ulmus 'Columella'</i>	Orme 'Columella'	
<i>Ulmus glabra</i> Huds.	Orme des montagnes	
<i>Ulmus minor</i> Mill.	Orme champêtre	
<i>Ulmus 'Sapporo Autumn Gold'</i>	Orme Résistant Sapporo Gold	
<i>Zelkova serrata</i>	Zelkova du Japon	

Afin d'éviter des plantations mono-spécifiques, moins résilientes et moins intéressantes sur le plan de la biodiversité, une liste de 220 espèces végétales en termes d'élimination des principaux polluants de l'air et gaz à effet de serre (O₃, NO₂, PM₁₀, CO₂) et de stockage carbone est fournie en Annexe 2. À noter que la sélection finale doit tenir compte d'autres cofacteurs tels que les émissions de pollens allergisants (Cariñanos et Marinangeli, 2021), la toxicité (Von Döhren et Haase, 2022), la résilience au changement climatique, l'envahissement, l'attractivité des oiseaux et des pollinisateurs, le besoin en eau, la tolérance à la sécheresse, la résistance aux maladies et ravageurs, et la maintenance.

La solution préconisée pour essayer de répondre aux nouvelles conditions climatiques et de pollution de l'air est de mélanger les essences et d'accompagner les arbres avec des strates arbustives et herbacées pour réduire leur vulnérabilité aux futures perturbations.

Il paraît indispensable d'utiliser toute la gamme des végétaux : **indigènes, exotiques et variétés**. La sélection des plantes est une **étape cruciale** pour une bonne planification urbaine car les espèces végétales n'ont pas la même capacité à éliminer les polluants atmosphériques et dans certains cas elles émettent des COV précurseurs d'O₃.

Comparaison entre espèces dans différentes villes

Les 15 espèces communes à Valencia et Bucarest ont montré des capacités de dépollution atmosphérique différentes (Tab. 8). Globalement, l'absorption nette d'O₃ était plus élevée à Valencia qu'à Bucarest. *Liriodendron tulipifera* est l'espèce la plus performante en termes d'absorption nette d'O₃ à Valencia, tandis qu'à Bucarest, *A. hippocastanum* présente la valeur la plus élevée. *Liriodendron tulipifera* et *Quercus rubra* sont les deux espèces les plus performantes dans l'élimination du NO₂ et PM₁₀ à Valencia et Bucarest.

Tableau 8 – Comparaison de la capacité d'élimination des principaux polluants de l'air pour des espèces végétales présentes à Valencia et Bucharest - Ozone (g O₃ arbre⁻¹ jour⁻¹), dioxyde d'azote (g NO₂ arbre⁻¹ jour⁻¹), particules (g PM₁₀ arbre⁻¹ jour⁻¹).

Genre	Espèce	Valencia			Bucharest		
		Net O ₃	NO ₂	PM ₁₀	Net O ₃	NO ₂	PM ₁₀
<i>Aesculus</i>	<i>hippocastanum</i>	- 13,20	- 9,86	- 0,31	- 5,47	- 1,95	- 0,27
<i>Ailanthus</i>	<i>altissima</i>	- 4,37	- 3,27	- 0,32	- 1,79	- 0,62	- 0,28
<i>Ficus</i>	<i>carica</i>	- 0,27	- 1,64	- 0,19	+ 0,55	- 0,31	- 0,17
<i>Gleditsia</i>	<i>triacanthos</i>	- 12,76	- 9,85	- 0,89	- 5,02	- 1,82	- 0,77
<i>Juglans</i>	<i>regia</i>	- 6,95	- 6,12	- 0,62	- 2,38	- 1,15	- 0,53
<i>Liriodendron</i>	<i>tulipifera</i>	- 15,39	- 18,84	- 1,79	- 3,35	- 3,68	- 1,54
<i>Magnolia</i>	<i>grandiflora</i>	+ 1,40	- 7,00	- 0,78	+ 2,85	- 1,99	- 0,72
<i>Morus</i>	<i>alba</i>	- 1,71	- 1,29	- 0,14	- 0,67	- 0,24	- 0,12
<i>Paulownia</i>	<i>tomentosa</i>	- 3,73	- 2,75	- 0,32	- 1,51	- 0,53	- 0,28
<i>Populus</i>	<i>nigra</i>	+ 115,46	- 7,68	- 0,70	+ 87,27	- 1,43	- 0,61
<i>Prunus</i>	<i>cerasifera</i>	- 0,86	- 0,63	- 0,07	- 0,34	- 0,12	- 0,06
<i>Prunus</i>	<i>serrulata</i>	- 0,15	- 0,11	- 0,01	- 0,06	- 0,02	- 0,01
<i>Quercus</i>	<i>rubra</i>	+ 0,04	- 12,88	- 2,17	+ 5,51	- 2,48	- 1,86
<i>Robinia</i>	<i>pseudoacacia</i>	+ 6,64	- 4,19	- 0,42	+ 6,62	- 0,81	- 0,36
<i>Styphnolobium</i>	<i>japonicum</i>	- 6,65	- 6,84	- 0,72	- 1,90	- 1,32	- 0,62

Planter « *les bonnes espèces au bon endroit* » est crucial pour maximiser les bénéfices fournis par les arbres urbains, comme la réduction de la pollution de l'air. Pour optimiser les bénéfices de l'arbre en ville, il faut sélectionner des espèces végétales:

1. adaptées aux conditions environnementales locales, urbaines et au changement climatique;
2. aux capacités maximales d'élimination des polluants (O₃, PM₁₀, NO₂);
3. avec un faible potentiel de formation d'O₃;
4. aux capacités maximales d'élimination des gaz à effet de serre et de séquestration du carbone;
5. efficaces pour l'atténuation des ICU (fort potentiel rafraîchissant);
6. émettant peu de COV et pollens allergènes;
7. attractives pour les insectes pollinisateurs (espèces mellifères) et la biodiversité;
8. résistantes (maladies, ravageurs, déficit hydriques, ozone);
9. à la croissance rapide et sans racines déformantes; et
10. à faibles besoins en eau.

3.4. Expérience utilisateurs

3.4.1. Besoins des Utilisateurs identifiés

En début de projet, nous avons organisé des réunions (présentiel et distanciel) afin de recueillir les besoins des municipalités (utilisateurs = **urbanistes**). De nombreuses villes ont déjà développé des plans de verdissement, bien que certaines **étapes cruciales** fassent encore défaut pour assurer leurs succès à long terme. Cela inclut l'obtention d'un engagement politique et la prise en compte des limites en ressources financières. Généralement, les stratégies de verdissement sont mises en œuvre dans le cadre d'initiatives plus larges de durabilité, telles que l'adaptation au climat ou la stratégie biodiversité. La définition d'objectifs politiques et le suivi de l'état actuel de la nature (par exemple, les espaces verts) et de la biodiversité se révèlent être les étapes les plus difficiles.



Figure 23 – Rencontre avec les acteurs locaux et les élus de la ville de Bucharest en novembre 2024.

Il est **primordial pour les collectivités** d'avoir un inventaire complet de leur patrimoine arboré afin de calculer précisément la part de polluants et gaz à effet de serre (CO₂, O₃) absorbée par les arbres présents et de mettre en place un plan de (re)boisement adapté au réel besoin.

La ville de Bucarest souhaitait avoir accès à un **inventaire** des arbres de la ville, car actuellement elle ne possède pas d'inventaires des arbres publics. La municipalité a souhaité mener une étude sur 4 zones de Bucarest.

Actuellement, il n'existe aucune recommandation sur la mise en œuvre des plans de verdissement, laissant leur mise en place aux connaissances des urbanistes dans chaque ville.

Les deux municipalités ont mentionné le **besoin d'un outil (inventaire)**, adaptable à leur environnement SIG, pour :

- ✓ **répertorier les arbres publics et privés** avec leurs principales caractéristiques (espèce, localisation, état de santé, hauteur).
- ✓ Produire une **carte précise** des arbres urbains, soutenant la planification des infrastructures vertes et les efforts de résilience de la ville.
- ✓ **quantifier les services écosystémiques** fournis par les arbres urbains, principalement pour séquestrer le CO₂.
- ✓ Trouver des espaces appropriés pour la (re)végétalisation, ce qui est un **obstacle majeur** à la mise en œuvre des plans de verdissement.
- ✓ Une **sélection d'espèces végétales** adaptées au milieu urbain, résilientes au changement climatique et appropriées pour l'amélioration de la qualité de l'air.

Les deux municipalités ont mentionné le **quelques prérequis**:

- ✓ Taux de détection correct (satellite vs contrôle terrain), ex. 90 % d'arbres détectés.
- ✓ Adaptable à leur environnement SIG.
- ✓ Taux d'erreur d'estimation de la hauteur des arbres de l'ordre de 1m.
- ✓ Densité d'arbres / km².
- ✓ Accès à une plateforme pour visualiser les données.
- ✓ Interface utilisateur intuitive.
- ✓ Mise à disposition des données aux municipalités.
- ✓ Formats ouverts et standardisés (CSV, shapefile, etc.) pour faciliter l'exploitation.

3.4.2. Retours des Utilisateurs

SCO GreenSpace propose aux villes une **cartographie** par télédétection spatiale (imagerie THR) *i.* de leur **patrimoine arboré**, et *ii.* de **ses attributs** (espèce, localisation, hauteur, capacité à éliminer les polluants); ceci permet de compléter les inventaires municipaux qui n'incluent que 20 à 30% dudit patrimoine arboré, alors que le reste est en propriétés privées.



Cet inventaire complet permet de quantifier de manière réaliste les services fournis par les arbres en termes de (a) filtrage de la pollution de l'air, et (b) stockage du carbone atmosphérique dans et autour des villes, ce qui répond aux besoins créés par la promulgation des lois relatives au Grenelle de l'environnement et la directive Européenne COM(2020)380 qui oblige les villes d'au moins 20 000 habitants à produire d'une part un Bilan Carbone et un Plan Climat Air Energie Territorial, et d'autre part à développer un plan de verdissement urbain ambitieux.

En fonction du type d'habitats urbains, des conditions climatiques, et des besoins spécifiques des municipalités, **SCO GreenSpace** a permis de valider la mise à disposition d'informations de base ainsi que le modèle pour quantifier la quantité de polluants de l'air éliminée par le patrimoine arboré et la méthodologie de sélection des espèces d'arbres appropriées dans 5 villes européennes (TRL 6 => TRL 9 fin de projet).

Retours positifs

- Vue globale et rapide de la couverture arborée - utilité pour planifier la (re)végétalisation et prioriser les zones.
- Outil utile pour la maintenance préventive (repérer arbres malades/risques).
- Outil d'aide, mais il faut pouvoir valider sur le terrain et éditer l'inventaire.
- Aide aux plans de gestion.
- Aide à valoriser l'écosystème (subventions, projets de compensation carbone).

Remarques

- Les images satellites seront-elles assez précises pour distinguer espèces/tailles ?
- Quel est le coût total (acquisition, traitement, mise à jour) versus bénéfices concrets ?
- Fréquence de mise à jour des images.
- Intégration avec SIG municipal existant et workflows des services espaces verts.
- Capacité à détecter bosquets, haies et petits arbres et non seulement grands houppiers.
- Ciblage d'espèces et de petits éléments : compléter par du LIDAR ou prises de vues aériennes à plus haute résolution.
- Protocoles de confidentialité et de gouvernance (qui accède, durée de conservation, droit de retrait des propriétaires).
- Interopérabilité : export-import vers SIG, API, formats standards (GeoJSON, shapefile).

SCO GreenSpace apporte une nouvelle **valeur ajoutée** sur le plan écologique, à l'heure où des mairies cherchent à déployer des projets « Nature en Ville » ou « Ville durable », l'inventaire arboricole complet devenant accessible aux collectivités territoriales, sachant qu'il n'y a pas de verrous technologiques importants : pour surmonter la complexité des zones urbaines (ex., forte similitude spectrale des types de végétation, arbres souvent isolés, proximité des immeubles, ombres) nous exploitons les caractéristiques spectrales et texturales des images, et la tri-stéréoscopie, lors de la segmentation d'image.

La précision de classification la plus faible est principalement due au faible nombre d'échantillons d'apprentissage, par exemple pour *Magnolia grandiflora*. Pour ces espèces d'arbres, il est difficile de trouver des échantillons de référence fiables en milieu urbain, car elles ne se trouvent généralement pas en peuplements purs. Certaines erreurs de classification sont probablement dues à des erreurs dans le jeu de données de référence. Hartling et al. (2019) ont testé l'effet du nombre d'échantillons d'apprentissage sur la performance des classifieurs et ont suggéré de sélectionner des espèces d'arbres avec plus de 100 échantillons de terrain collectés dans la zone d'étude. La faible précision peut également être due au petit diamètre de la couronne (< 3 m) et/ou à la variabilité de la réflectance des canopées et de leur arrière-plan, tel que le sous-étage et le sol.

3.4.3. Promotion et diffusion du service

Tous les produits non confidentiels générés dans le cadre du projet **SCO GreenSpace** sont librement accessibles sur demande. Une activité essentielle du projet est la mise en place d'une campagne de communication. L'objectif est de synthétiser les principaux résultats et de valoriser les résultats à long terme. Les groupes cibles identifiés sont : 1) les responsables politiques; 2) les urbanistes; 3) la société civile et le grand public et 4) la communauté scientifique.

Notre équipe de communication présentera ces nouveaux services sur l'ensemble de nos sites internet et réseaux sociaux (Twitter et LinkedIn) afin de profiter de notre popularité dans notre secteur d'activité. Nous profiterons de nos participations à des événementiels et webinar pour présenter ce nouvel outil dans une thématique aux enjeux sociétales forts. Le projet sera bien évidemment intégré à notre programme de communication (présentation d'entreprise, brochure, posters, rédaction d'articles scientifiques). Les premières cibles commerciales sont en France. A l'international, nous pouvons nous appuyer sur nos bureaux et les bureaux du groupe en Angleterre, au Luxembourg, et en Espagne. Pour le reste de l'Europe, nous rechercherons des représentants, sans avoir fait encore le choix entre sociétés spécialisées dans le spatial (cas en Autriche et Allemagne) et sociétés spécialisées en jardinage et taille d'arbres auxquels où nous assurerions la formation d'opérateurs en télédétection spatiale.

→ **Promotion auprès des représentants de la ville, élus locaux et associations de maires :** promotion marketing directe auprès des associations de maires, des élus locaux, des services municipaux « espaces verts » et adjoint au maire à l'environnement (étant donné que les représentants municipaux sont souvent confrontés à des points de vue contrastés, il est utile de présenter les services de manière claire et concise, par exemple, via une présentation au congrès annuel de maires), pour intégrer plantation/entretien des arbres dans les plans municipaux de qualité de l'air et de rénovation des villes, pour en faire des villes plus résilientes, saines et durables.

Message clé : arbres en ville = moyen efficace et populaire pour une régénération urbaine et pour atteindre les objectifs environnementaux, économiques et sociaux de votre ville.

→ **Promotion auprès des urbanistes :** publication d'articles dans des magazines de design/architecture, illustrant des exemples qualitatifs des bénéfices et bonnes pratiques des zones urbaines nouvellement reboisées, mais aussi par l'invitation des urbanistes à des conférences, forums et événements où les professionnels peuvent être plus impliqués.

Message clé : arbres en ville = développement durable et efficace d'une ville, car ils renforcent la cohésion sociale et rendent la ville plus saine et plus vivable pour tous.

→ **Diffusion à l'international :** via les bureaux de notre groupe, mais il convient de mentionner en particulier le Groupe d'Experts *Clean Air in Cities* (EP-CAC), travaillant sous l'égide de la Commission Economique des Nations Unies pour l'Europe (CEE-ONU) dont la mission est de communiquer sur les bénéfices d'une meilleure gestion urbaine et de trouver un mélange optimal d'actions politiques aux échelles locales, nationales et internationales pour améliorer la qualité de l'air en ville et atteindre les Objectifs de Développement Durable des Nations Unies. Nous fournirons les bénéfices environnementaux quantifiés directement issus des zones urbaines et périurbaines. L'EP-CAC fournira un **espace scientifique et politique** pour l'analyse des stratégies efficaces en matière de qualité de l'air en Europe.

4. Bilan vis-à-vis du SCO

Jusqu'à présent, la capacité des arbres urbains à éliminer la pollution atmosphérique n'a été étudiée que dans quelques villes, et les évaluations reposent principalement sur la modélisation (i-Tree Eco) ainsi que sur des caractéristiques des arbres issues d'inventaires municipaux ou d'images satellites à résolution spatiale modérée telles que Landsat ou les capteurs MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-Radiometer). Pour la première fois, **SCO GreenSpace** a pu quantifier et cartographier les bénéfices que les espaces verts génèrent pour l'atténuation des impacts du changement climatique, grâce au stockage du carbone et à la réduction de la pollution de l'air, à l'échelle des villes. Le coût total du projet est estimé à 350 k€, dont 150 k€ correspondent à des financements passés de R&D par l'Union Européenne, 100k€ par des financements propres de la société, et 100 k€ qui pourrait être apporté par le programme SCO. L'aide a permis de lancer rapidement les développements en ayant moins recours aux fonds propres afin que le système puisse être sur le marché, ce qui lui garantira une avance technologique et commerciale indéniable.

La télédétection par satellite offre clairement un meilleur diagnostic et permettra aux municipalités de calculer avec précision, voire d'optimiser, leurs plans de plantation, à un coût inférieur à celui de la télédétection aérienne (par exemple, le lidar aéroporté).

La **synergie avec les projets SCO** a permis d'éviter de dupliquer des actions déjà menées et de maximiser l'impact des solutions proposées, en particulier GreenUrbanSat pour l'analyse des espaces verts, la détection des arbres. GreenUrbanSat a développé, à partir d'images satellitaires, une base géospatiale de la végétation et des services écosystémiques.

En **conclusion**, nous sommes actuellement la seule entreprise en Europe à avoir développé de tels services avec un niveau de maturité technologique (TRL) élevé, malgré les affirmations de nombreuses entreprises ou start-up (par exemple, MEOSS). **SCO GreenSpace** est le seul service innovant proposant :

- Un inventaire précis de la diversité des arbres par télédétection satellitaire, sans recours aux drones,
- Une quantification scientifiquement reconnue de la capacité des arbres urbains à éliminer les polluants atmosphériques et les gaz à effet de serre, ainsi que
- Des recommandations de « bonnes pratiques » pour i) développer des PCAET adaptés, et ii) concevoir des plans de végétalisation urbaine.

5. Perspectives et marchés

5.1. Perspectives

Un démonstrateur du service **SCO GreenSpace** a été déployé dans 5 villes en Europe (Aix-en-Provence, Florence, Kaunas, Valencia et Bucharest). Nous passons à la phase de commercialisation en considérant les besoins spécifiques des communes. Il faut en outre ajouter des fonctionnalités qui vont permettre l'**automatisation** et la **commercialisation** du système.

Nous fournirons aux municipalités les informations nécessaires pour se conformer aux nouvelles réglementations liées au Green Deal européen, ainsi que des lignes directrices pour une stratégie de plantation des arbres urbains et péri-urbains. S'y rajoutera un **transfert de connaissances** aux urbanistes : les résultats seront résumés dans un SIG adapté au contexte local et préparées avec les parties prenantes locales.

La méthodologie présente toutefois plusieurs limites, qui seront creusées dans une version plus approfondie dès le mois de décembre 2025 :

- ✓ La détection de la végétation est légèrement surestimée et empiète sur les autres classes, malgré la paramétrisation optimale des valeurs de seuils.
- ✓ La méthode n'est pas 100% automatique. Elle nécessite l'intervention d'un opérateur externe pour optimiser différentes valeurs de seuils. Le développement devrait pouvoir rendre la méthode plus facilement répliquable.
- ✓ Besoin primordial d'un inventaire municipal (base d'apprentissage) complet.

Les actions de (re)végétalisation urbaine sont-elles conformes aux attentes des municipalités? Pour y répondre, la construction d'un **jumeau numérique**, combinant données satellitaires, intelligence artificielle, SIG et scénarios climatiques, aidera les municipalités à évaluer différents scénarios d'aménagement, outil essentiel pour aider les villes à développer des espaces verts résilients et neutres en carbone.

Pour évaluer la résilience des espaces verts et leur rôle dans l'atténuation des effets du changement climatique, le jumeau numérique intégrera des modèles environnementaux, climatiques et urbains. ACRI-ST a développé des outils pour la détection et la classification des arbres en villes et l'évaluation des services écosystémiques (FlorTree). PALM-4U, exécuté avec une résolution spatiale de 5m, permet une modélisation 3D des villes (bâtiment, arbres individuels, etc.). Les simulations seront réalisées à l'aide du modèle méso-échelle WRF/Chem. Les scénarios *what-if* permettront de simuler différentes stratégies de (re)végétalisation selon des scénarios climatiques (*Shared Socioeconomic Pathways*) et de comparer leurs impacts en tenant compte de la disponibilité en eau, de la croissance urbaine et des tendances socio-économiques.

Cette capacité prédictive est cruciale pour la planification urbaine à long terme et les stratégies d'adaptation au changement climatique. Le jumeau numérique sera intégré dans une architecture modulaire, permettant des simulations en temps réel, adaptable à différents contextes urbains et scalable pour de futures extensions (*Findability, Accessibility, Interoperability, Reusability*).

L'avantage d'un jumeau numérique réside dans sa capacité à simuler et évaluer des **scénarios hypothétiques**. En croisant les données sur le bâti, l'occupation du sol et les conditions météorologiques, il oriente les stratégies de (re)végétalisation. Cela aide les urbanistes à prendre des décisions éclairées sur les espaces prioritaires pour ajouter de la végétation et sur la manière dont celle-ci peut être utilisée le plus efficacement possible, par exemple pour réduire la pollution de l'air et atténuer les ICU. Il évalue également les services écosystémiques rendus par les espaces verts urbains et leur évolution dans le temps.

L'approche 3-30-300 proposée par le Prof. Cecil Konijnendijk stipule que tout le monde doit pouvoir voir de chez lui au moins 3 arbres; se déplacer dans des quartiers avec 30% surface arborée; et avoir accès à un espace vert à moins de 300 mètres de chez lui (Konijnendijk, 2023). Le jumeau numérique permettrait de cartographier la conformité à la règle 3-30-300 afin de cartographier **les espaces prioritaires** disponibles pour la renaturation.

5.2. Marchés adressés

Pour une urbanisation durable et résiliente, il est primordial pour les collectivités de connaître leur patrimoine arboré complet et de **mettre en place un plan de verdissement**:

alors que l'obtention de données précises sur l'emplacement, les espèces et les caractéristiques structurales des arbres en ville sont généralement obtenues par observations visuelles sur le terrain, coûteuses et chronophages (à titre d'exemple, à Aix-en-Provence avec 5000 arbres/km² environ, il faudrait environ 1 000 heures d'investigation terrain soit plus d'1/2 homme x an / km²),

la télédétection spatiale apparaît comme une évidence pour ce travail de diagnostic et permettra aux municipalités de calculer précisément, voire de réduire, leur plan de plantation, à un coût moindre que l'usage d'un lidar aéroporté.

Il n'y a pas, à ce jour, d'offre commerciale similaire en Europe. **SCO GreenSpace** est l'unique service qui propose aujourd'hui un état des lieux réel et précis de la diversité des arbres, de leur état de santé, et une quantification réaliste de l'élimination des polluants de l'air et des Gaz à Effet de Serre par les arbres en zone urbaine

Il est donc essentiel pour ces collectivités de connaître leur inventaire complet des espaces verts afin de mettre en place un plan de (re)végétalisation adapté aux besoins réels.

SCO GreenSpace cible le **marché des collectivités territoriales européennes** - cf. la réglementation qui génère le besoin : La directive Européenne COM(2020)380 qui oblige les villes d'au moins 20 000 habitants à développer un plan de verdissement urbain. À l'échelle **nationale**, les principaux utilisateurs sont à la fois les services techniques des mairies ou regroupements d'agglomération, les autres collectivités territoriales type conseils régionaux, les ministères en charge des forêts et de la gestion urbaine, et le ministère de l'Environnement. A ce jour, 470 villes en France et plus de 1000 villes en Europe recensent plus de 20 000 habitants et doivent être conformes à la directive européenne. De plus, il est important de rappeler qu'à ce jour, les municipalités ne font état de leur bilan carbone qu'à travers l'inventaire des arbres dans l'espace public. Or, l'espace privée, supérieur en superficie en zone urbaine, doit être intégré à part entière dans ce bilan. De ce fait, il est primordial pour ces collectivités de connaître leur inventaire complet afin de mettre en place un plan de reboisement adapté au réel besoin.

Avec **SCO GreenSpace**, les services des espaces verts et services techniques établiront des économies notables par une analyse de l'état écologique de chaque arbre régulièrement avec une possibilité de configurer des alertes selon les entretiens nécessaires à chaque espèce (taille, élimination, ...).

Modèles de revenu

Nous établirons un tarif générique par ville (ou zone urbaine), calculé en fonction de la surface, avec un ajustement selon la durée pendant laquelle le service est acheté par l'autorité locale, et la fréquence de mise à jour de la cartographie (annuelle, tous les 3 ans, tous les 5 ans). Par exemple, 420 villes en France ont plus de 20 000 habitants (hors DOM-TOM). Sachant que les 20 plus grandes villes françaises de plus de 20 000 habitants ont une surface moyenne de 200 km² (information nécessaire pour l'achat d'images satellites), les services **SCO GreenSpace** pourraient générer un chiffre d'affaires de 1,5 à 2,0 M€, réparti sur 2 à 3 ans, pour couvrir les coûts directs et indirects, hors amortissement des investissements liés à la mise en place du service et à la R&D, et hors bénéfices, en fonction de la densité des arbres. Pour les 40 villes suivantes (surface moyenne de 70 km²), les services **SCO GreenSpace** pourraient générer 1,5 M€ de chiffre d'affaires sur 2 à 3 ans, et environ 2,0 M€ pour les 360 villes restantes. En résumé, un marché de 2,1 M€/an pour un pays comme la France. Par exemple, si les autorités locales publient des appels d'offres compétitifs, il est à prévoir que des organismes publics (par ex. ADEME, CEREMA) soumettent une proposition, ce qui réduirait notre part de marché. Le reste du marché européen est plus vaste, par un facteur 4 à 5 par rapport à la France. Nous anticipons donc une part de marché de 20 % au lieu de 50 %. Un inventaire du patrimoine arboré devrait être réalisé tous les 2 à 3 ans, le chiffre d'affaires minimum à atteindre serait de 4 à 6 M€ sur une période de 6 ans.

6. Démarche environnementale lors de la mise en œuvre du projet

On estime qu'environ 30 % des émissions de gaz à effet de serre proviennent de la « fourniture de biens ». ACRI-ST prend en compte les produits éco-labellisés dans ses procédures d'achat, conformément à sa propre politique de **Responsabilité Sociétale des Entreprises**. ACRI-ST intègre les préoccupations sociales et environnementales dans ses activités et ses interactions avec les parties prenantes. Notre approche se traduit par une gestion optimisée de notre empreinte carbone.

1. Sobriété Numérique et Optimisation Technique

Le projet a été travaillé en gérant un volume de données maîtrisé (136 Go) sur nos infrastructures internes (Data Center Biot/Sophia Antipolis). Pour garantir une performance optimale tout en minimisant l'impact, nous avons mutualisé nos ressources et nos algorithmes d'analyse (pan-sharpening, ortho-rectification) avec d'autres projets de recherche (LIFE AIRFRESH, FreshSpace). Cette synergie a permis d'éviter le redéveloppement de codes et d'assurer une réduction significative de la consommation électrique de nos serveurs et postes de travail.

2. Organisation du Travail :

L'équipe projet (4 internes + 1 externe) a privilégié une gestion mixte combinant le télétravail et les outils collaboratifs. Le suivi a été assuré par 5 réunions à distance (visioconférence), les 3 déplacements physiques étant strictement réservés aux moments clés du projet. Cette rationalisation a permis de maintenir le bilan transport du projet à un niveau acceptable (~800 kg CO₂-eq). En comparaison, ce pilotage a permis d'éviter l'émission de plusieurs tonnes de CO₂-eq (émissions évitées) qui seraient inhérentes à une gestion de projet classique en présentiel.

3. Achats Responsables et Expertise Externe

Nous avons concentré les dépenses sur le cœur de l'expertise : l'imagerie satellite (Pléiades) et la sous-traitance spécialisée (CEAM). Cette approche a permis d'éviter l'acquisition de nouveaux équipements physiques dédiés au projet, limitant l'impact de fabrication de matériel neuf. Tous les achats et prestations externes s'inscrivent dans une démarche de cohérence avec la politique d'achat responsable d'ACRI-ST.

Bilan Carbone du projet: 4354 Kg eq CO₂

Poste	Emission (kg eq CO ₂)	Poste	Emission (kg eq CO ₂)
Déplacements	788,33	Equipement informatique (hors usages)	174,50
Visioconférence	0,48	Calculs / stockage	0,34
Environnement et Postes de travail	1108,96	Achats & Prestations	2281,50

Conclusions

SCO GreenSpace a permis de développer une approche par satellite pour détecter, délimiter et classer la végétation urbaine dans les zones publiques et privées, avec la sélection de caractéristiques spectrales et texturales pertinentes pour chaque espèce végétale. Les principales caractéristiques des arbres individuels (par exemple, l'espèce, la hauteur, la couverture de la canopée) sont dérivées à l'aide d'une approche de classification, de techniques de prétraitement comprenant la correction atmosphérique, le pan-sharpening et la correction spatiale pour dériver l'indice de végétation à partir d'images satellite à très haute résolution Pléiades (résolution spatiale de 0,5 m). Nous avons développé un modèle pour quantifier et cartographier la capacité d'élimination des polluants atmosphériques (CO₂, O₃, PM₁₀, et NO₂) d'environ 220 espèces végétales. L'**outil géospatial** à l'échelle de la ville est essentiel pour aider les villes à élaborer des plans de verdissement urbain résilients et neutres pour le climat.

Une stratégie de végétalisation en milieu urbain a pour objectif d'augmenter l'indice global de végétalisation d'une ville au-delà de 30%. À cette fin, la végétation peut être disposée ou densifiée dans de nombreux espaces comme le long des axes de transport (platebandes de rues, ruelles, etc.), sur les terrains publics (parcs, terrains municipaux, cours d'école, etc.), sur les terrains privés (jardins des particuliers et de copropriétés, pourtours de bâtiments résidentiels et commerciaux, etc.) représentant plus de 80% du patrimoine arboré d'une ville; et sur les toits et murs.

Acer sp., *Celtis australis*, *Gleditsia triacanthos*, *Tilia sp.*, adaptées aux conditions locales et urbaines, présentent les meilleures caractéristiques pour réduire la pollution atmosphérique. Les espèces végétales dont les feuilles ont une surface rugueuse, ou les conifères tels que les cèdres captent efficacement les particules, en raison de la structure des épines/aiguilles. *Cedrus libani*, *Cedrus atlantica* et *Cedrus deodara* ont une capacité importante à capturer et éliminer les PM₁₀ de l'air et pourraient être plantées dans des zones caractérisées par des niveaux élevés de particules fines, par exemple le long des axes routiers. La végétation est plus sensible à la quantité d'eau disponible qu'aux températures (Li et al., 2022). Il est donc nécessaire de planter des arbres résistants à la sécheresse, à faibles besoins en eau, par exemple en augmentant la part d'espèces végétales subtropicales adaptées aux conditions urbaines, par exemple *Celtis australis*, *Chitalpa tashkentensis*, *Firmiana simplex* ou *Tipuana tipu*. Avec une augmentation des températures, en particulier aux heures les plus chaudes de la journée en été, l'effet d'îlot de chaleur urbain sera plus marqué. Il faut planter des arbres dont le potentiel rafraichissant et d'ombrage est maximal.

La population est un utilisateur clé et un partisan des espaces verts, et donc un acteur essentiel à impliquer. Il est recommandé d'encourager les initiatives de verdissement à petite (copropriétés, jardins privés). À ce titre, il est important de sensibiliser le public, et notamment les scolaires, à l'importance des arbres dans les villes et aux bénéfices que les arbres peuvent apporter.

Messages clés

- Une nouvelle méthodologie a été développée pour détecter, classer et cartographier les arbres individuels et les espaces verts à l'échelle de la ville, et quantifier la quantité de polluants de l'air qu'ils éliminent.
- Les arbres éliminent les polluants de l'air, par exemple les PM₁₀, le NO₂, l'O₃ et le CO₂, mais leur efficacité dépend des espèces et des conditions climatiques locales.
- Des recommandations scientifiquement fondées sur les meilleures espèces végétales ont été mises à disposition. Les recommandations diffèrent selon les villes.
- La quantité de polluants éliminés peut compenser les émissions de milliers de voitures, par exemple à Valencia, les arbres éliminent chaque année 197 tonnes de NO₂ (correspondant aux émissions de 46 100 voitures), 37 tonnes de PM₁₀ (56 160 voitures) et 5 428 tonnes de CO₂ (3 420 voitures).
- Augmenter le couvert arboré à Bucarest et Valencia à 30% pourrait éviter **508 décès prématurés** attribués à la pollution de l'air chaque année.
- Ces résultats aident à la mise en œuvre des stratégies de l'UE, par exemple sur la protection de la biodiversité d'ici 2030 dans l'UE.

Références bibliographiques

Annexe 1 – Liste des espèces végétales présentes dans la zone d'étude de Valencia (56km²).

Espèce	Nombre	Espèce	Nombre	Espèce	Nombre
Citrus_x_aurantium	11832	Parkinsonia_aculeata	83	Araucaria_montana	7
Platanus_x_hispanica	10591	Rhaphiolepis_bibas	80	Bauhinia_sp	7
Melia_azedarach	7795	Leucaena_leucocephala	75	Eucalyptus_sp.	7
Celtis_australis	7166	Citrus_sp.	74	Juniperus_horizontalis	7
Washingtonia_robusta	6195	Ficus_auriculata	72	Juniperus_oxycedrus	7
Phoenix_dactylifera	5921	Butia_capitata	68	Tilia_americana	7
Ligustrum_japonicum	5273	Taxus_baccata	67	Aesculus_carnea	6
Morus_alba	5173	Pinus_sp.	66	Araucaria_columnaris	6
Jacaranda_mimosifolia	5084	Cedrus_atlantica	65	Archontophoenix_alexandrae	6
Acer_negundo	4756	Juniperus_thurifera	65	Carissa_macrocarpa	6
Brachychiton_populneus	4533	Hibiscus_tiliaceus	59	Ceiba_insignis	6
Cupressus_sempervirens	3937	Sabal_palmetto	59	Diospyros_lotus	6
Cercis_siliquastrum	3756	Tilia_cordata	57	Malus_sylvestris	6
Tipuana_tipu	2849	Salix_babylonica	56	Malus_x_floribunda	6
Styphnolobium_japonicum	2589	Zelkova_sp.	56	Melaleuca_sp.	6
Pinus_pinea	2531	Arbutus_unedo	54	Ostrya_carpinifolia	6
Phoenix_canariensis	2515	Pterocarya_fraxinifolia	54	Prunus_laurocerasus	6
Pinus_halepensis	2504	Morus_nigra	53	Acacia_baileyana	5
Prunus_cerasifera	2431	Photinia_serratifolia	53	Chamaecyparis_lawsoniana	5
Ficus_benjamina	1909	Platanus_orientalis	52	Juniperus_virginiana	5
Grevillea_robusta	1834	x_Hesperotropsis_leylandii	52	Persea_americana	5
Chamaerops_humilis	1469	Liriodendron_tulipifera	51	Podranea_ricasoliana	5
Robinia_pseudoacacia	1450	Rhamnus_alaternus	51	Trithrinax_campestris	5
Washingtonia_filifera	1402	Pinus_sylvestris	50	Acacia_sp.	4
Ulmus_pumila	1370	Euonymus_japonicus	49	Annona_cherimola	4
Populus_alba	1294	Viburnum_tinus	49	Cedrus_sp.	4
Quercus_ilex	1249	Acacia_saligna	47	Cocculus_laurifolius	4
Olea_europaea	1245	Ficus_microcarpa	47	Crataegus_germanica	4

Fraxinus_ornus	1206	Populus_x_canadensis	44	Crataegus_laciniata	4
Trachycarpus_fortunei	1063	Acer_saccharinum	43	Diospyros_kaki	4
Pittosporum_tobira	963	Brahea_armata	42	Dypsis_decaryi	4
Syagrus_romanzoffiana	962	Ulmus_sp.	41	Ficus_craterostoma	4
Populus_nigra	953	Cedrus_deodara	36	Fraxinus_americana	4
Fraxinus_angustifolia	944	Dracaena_draco	35	Gymnocladus_dioicus	4
Fraxinus_excelsior	931	Schotia_brachypetala	34	Moringa_oleifera	4
Pyrus_calleryana	931	Erythrina_caffra	33	Picea_abies	4
Morus_indica	839	Malus_sp.	32	Prunus_domestica	4
Ulmus_minor	834	Harpephyllum_caffrum	31	Prunus_mahaleb	4
Lagunaria_patersonia	784	Juniperus_communis	31	Wisteria_sinensis	4
Tilia_x_europaea	773	Tilia_tomentosa	31	Yucca_sp.	4
Koelreuteria_paniculata	742	Crataegus_monogyna	30	Araucaria_araucana	3
Ligustrum_lucidum	715	Bauhinia_forficata	29	Araucaria_sp.	3
Catalpa_bignonioides	674	Elaeagnus_angustifolia	29	Cupressus_cashmeriana	3
Brachychiton_acerifolius	647	Euonymus_europaeus	29	Juglans_nigra	3
Nerium_oleander	635	Tilia_sp.	29	Maclura_pomifera	3
Laurus_nobilis	591	Livistona_australis	28	Phoenix_rupicola	3
Schinus_molle	558	Metrosideros_excelsa	28	Populus_sp.	3
Tamarix_gallica	541	Acacia_retinoides	27	Rhapis_humilis	3
Populus_canadensis	510	Juniperus_scopulorum	27	Salix_x_fragilis	3
Pistacia_lentiscus	488	Feijoa_sellowiana	26	Tilia_x_euchlora	3
Casuarina_equisetifolia	481	Melaleuca_viminalis	26	Acer_palmatum	2
Gleditsia_triacanthos	468	Cupressus_sp.	25	Albizia_procera	2
Ceiba_speciosa	456	Prunus_sp.	25	Archontophoenix_cunninghamiana	2
Ginkgo_biloba	446	Prunus_amygdalus	24	Betula_pendula	2
Acer_pseudoplatanus	434	Cydonia_oblonga	23	Buxus sempervirens	2
Citrus_x_sinensis	434	Pistacia_terebinthus	23	Cycas_circinalis	2
Platyclusus_orientalis	391	Acer_buergerianum	22	Dioon_spinulosum	2
Punica_granatum	387	Malus_domestica	22	Fagus_sylvatica	2

Albizia_julibrissin	383	Citrus_x_microcarpa	20	Ficus_religiosa	2
Acer_monspessulanum	382	Cordyline_australis	20	Heptapleurum_arboricola	2
Paulownia_tomentosa	374	Acer_platanoides	19	Ilex_aquifolium	2
Pinus_canariensis	303	Ficus_sp.	19	Koelreuteria_bipinnata	2
Yucca_gigantea	303	Liquidambar_styraciflua	19	Lophostemon_confertus	2
Hibiscus_syriacus	297	Phanera_roxburghiana	19	Melaleuca_glauca	2
Celtis_occidentalis	287	Prunus_serrulata	19	Photinia_glabra	2
Bauhinia_variegata	278	Pyrus_sp.	19	Photinia_x_fraseri	2
Populus_simonii	278	Aesculus_hippocastanum	18	Picea_pungens	2
Magnolia_grandiflora	277	Sabal_minor	18	Pinus_mugo	2
Cupressus_arizonica	276	Cercis_canadensis	17	Pinus_strobus	2
Fraxinus_nigra	275	Juglans_regia	17	Prunus_avium	2
Firmiana_simplex	272	Platanus_occidentalis	16	Prunus_sargentii	2
Fraxinus_sp.	271	Salix_alba	16	Quercus_macrocarpa	2
Cycas_revoluta	262	Chitalpa_tashkentensis	15	Ravenala_madagascariensis	2
Phytolacca_dioica	257	Quercus_sp.	15	Salix_eleagnos	2
Pinus_pinaster	255	Ziziphus_jujuba	15	Scandosorbus_intermedia	2
Broussonetia_papyrifera	248	Celtis_sinensis	14	Strelitzia_alba	2
Brachychiton_discolor	247	Cinnamomum_camphora	14	Syagrus_sp.	2
Ficus_rubiginosa	240	Crataegus_azarolus	14	Syzygium_australe	2
Citrus_reshnii	222	Ficus_lyrata	14	Thuja_plicata	2
Hedera_helix	220	Phoenix_reclinata	14	Ulmus_x_hollandica	2
Bauhinia_candicans	198	Pyrus_communis	14	Vachellia_farnesiana	2
Tilia_platyphyllos	198	Quercus_pyrenaica	14	Amphilophium_buccinatorium	1
Ceratonia_siliqua	195	Tetraclinis_articulata	14	Arenga_engleri	1
Eucalyptus_camaldulensis	189	Cornus_domestica	13	Betula_alba	1
Ficus_elastica	184	Ficus_benghalensis	13	Brugmansia_suaveolens	1
Quercus_faginea	182	Fraxinus_pennsylvanica	13	Carpinus_betulus	1
Casuarina_cunninghamiana	174	Myoporum_tenuifolium	13	Cassia_spectabilis	1
Schinus_terebinthifolia	172	Phoenix_sp.	13	Casuarina_sp.	1

Araucaria_heterophylla	161	Quercus_coccifera	13	Cedrus_libani	1
Juniperus_foetidissima	161	Robinia_sp.	13	Celastrus_scandens	1
Hesperocyparis_macrocarpa	157	Salix_sp.	13	Celtis_iguanaea	1
Ailanthus_altissima	155	Tamarix_dalmatica	13	Cephalotaxus_harringtonia	1
Calocedrus_decurrens	154	Campsis_radicans	12	Citrus_trifolia	1
Hibiscus_rosa-sinensis	153	Vachellia_karoo	12	Corymbia_citriodora	1
Ficus_carica	148	Crataegus_sp.	11	Eucalyptus_gomphocephala	1
Pinus_nigra	145	Dioon_edule	11	Eucalyptus_obliqua	1
Ulmus_glabra	144	Heptapleurum_actinophyllum	11	Eugenia_uniflora	1
Livistona_chinensis	141	Acer_sp.	10	Euonymus_sp.	1
Bougainvillea_glabra	135	Crataegus_laevigata	10	Ficus_cyathistipula	1
Zelkova_serrata	126	Ficus_binnendijkii	10	Handroanthus_heptaphyllus	1
Yucca_aloifolia	125	Ficus_drupacea	10	Musa_x_paradisiaca	1
Acer_campestre	121	Quercus_pubescens	10	Nannorrhops_ritchiana	1
Tilia_americana_x_argentea	121	Quercus_robur	10	Phillyrea_latifolia	1
Melaleuca_citrina	117	Saribus_rotundifolius	10	Phoenix_sylvestris	1
Erythrina_crista-galli	114	Yucca_gloriosa	10	Pinus_taeda	1
Lagerstroemia_indica	114	Bismarckia_nobilis	9	Platanus_sp.	1
Cercis_chinensis	113	Citrus_japonica	9	Podocarpus_macrophyllus	1
Pistacia_chinensis	112	Parrotia_persica	9	Prunus_cerasus	1
Acacia_dealbata	105	Prunus_armeniaca	9	Quercus_rubra	1
Phoenix_roebelenii	100	Prunus_persica	9	Rhus_copallinum	1
Thuja_occidentalis	97	Taxodium_distichum	9	Rhus_typhina	1
Citrus_x_limon	95	Acacia_longifolia	8	Rosa_sp.	1
Morus_sp.	92	Brachychiton_rupestris	8	Serenoa_repens	1
Celtis_laevigata	87	Cotinus_coggygria	8	Strelitzia_nicolai	1
Eucalyptus_globulus	87	Cupressus_pendula	8	Syzygium_paniculatum	1
Quercus_suber	86	Phillyrea_angustifolia	8		
Bauhinia_purpurea	85	Populus_tremula	8		
Bougainvillea_sp.	84	Abies_spp	7		

Annexe 2 - Capacité d'élimination des principaux polluants de l'air d'espèces végétales présentes à Valencia – Ozone (g O₃ arbre⁻¹ jour⁻¹), dioxyde d'azote (g NO₂ arbre⁻¹ jour⁻¹), particules (g PM₁₀ arbre⁻¹ jour⁻¹), dioxyde de carbone (tonnes CO₂ arbre⁻¹ an⁻¹), et leur potentiel de formation d'ozone (PFO). Pour chaque espèce végétale, un score final a été obtenu en additionnant les scores individuels pour chaque polluant, de sorte qu'un score > 10 signifie une capacité d'élimination élevée (espèce végétale “recommandée”) et un score < 3 signifie une faible capacité d'élimination (espèce végétale “non recommandée”). *ND* = *non déterminé*

Genre	Espèce	O ₃ absorption	PFO	Bilan O ₃	Score O ₃	NO ₂ absorption	Score NO ₂	PM ₁₀ dépôt	Score PM ₁₀	CO ₂ séquestration	Score CO ₂	Total Score
<i>Abies</i>	<i>alba</i>	-4,87	1,05	-3,82	3	-4,55	3	-2,04	3	-0,04	2	11
<i>Acacia</i>	<i>dealbata</i>	-1,26	0,09	-1,16	2	-0,93	1	-0,10	1	-0,04	2	6
<i>Acer</i>	<i>campestre</i>	-2,98	0,06	-2,92	3	-2,21	2	-0,37	2	-0,06	3	10
<i>Acer</i>	<i>japonicum</i>	-0,45	0,05	-0,40	1	-0,33	1	-0,06	1	-0,01	0	3
<i>Acer</i>	<i>monspessulanum</i>	-1,55	0,28	-1,26	2	-1,14	1	-0,20	2	-0,06	3	8
<i>Acer</i>	<i>negundo</i>	-6,92	0,41	-6,51	3	-5,14	3	-0,81	3	-0,10	3	12
<i>Acer</i>	<i>platanoides</i>	-17,79	0,10	-17,69	3	-13,32	3	-2,04	3	-0,06	3	12
<i>Acer</i>	<i>pseudoplatanus</i>	-18,12	1,03	-17,09	3	-13,57	3	-2,04	3	-0,06	3	12
<i>Aesculus</i>	<i>hippocastanum</i>	-13,20	0,00	-13,20	3	-9,86	3	-0,31	2	-0,06	3	11
<i>Ailanthus</i>	<i>altissima</i>	-4,37	0,00	-4,37	3	-3,27	2	-0,32	2	-0,05	3	10
<i>Alnus</i>	<i>cordata</i>	-3,48	0,45	-3,03	3	-2,57	2	-0,29	2	-0,06	3	10
<i>Alnus</i>	<i>glutinosa</i>	-5,29	2,80	-2,50	3	-3,91	3	-0,43	2	-0,06	3	11
<i>Arbutus</i>	<i>unedo</i>	-2,00	0,12	-1,88	2	-1,81	2	-0,22	2	-0,02	0	6
<i>Betula</i>	<i>nigra</i>	-2,09	0,07	-2,02	2	-1,55	2	-0,34	2	-0,09	3	9
<i>Betula</i>	<i>pendula</i>	-2,09	0,43	-1,65	2	-1,56	2	-0,34	2	-0,03	1	7
<i>Buxus</i>	<i>sempervirens</i>	-0,24	0,94	+0,70	0	-0,22	1	-0,03	1	-0,02	0	2
<i>Callistemon</i>	<i>citrinus</i>	-0,15	0,54	+0,39	0	-0,13	0	-0,02	1	-0,02	0	1
<i>Camellia</i>	<i>sasanqua</i>	-2,17	0,00	-2,17	3	-1,97	2	-0,25	2	-0,02	0	7
<i>Capparis</i>	<i>spinosa</i>	-0,01	ND	ND	ND	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	ND
<i>Carpinus</i>	<i>betulus</i>	-7,76	0,02	-7,74	3	-5,79	3	-0,59	2	-0,07	3	11
<i>Cassia</i>	<i>corymbosa</i>	-0,04	ND	ND	ND	-0,03	0	-0,00	0	-0,04	2	ND
<i>Castanea</i>	<i>sativa</i>	-11,98	15,49	+3,51	0	-8,95	3	-0,92	3	-0,08	3	9

<i>Catalpa</i>	<i>bignonioides</i>	-5,30	0,72	-4,58	3	-3,91	3	-0,40	2	-0,04	2	10
<i>Ceanothus</i>	<i>arborescens</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>arboreus</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>crassifolius</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>cuneatus</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>greggii</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>leucodermis</i>	-0,02	0,02	-0,01	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>maritimus</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ceanothus</i>	<i>spinosus</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Cedrus</i>	<i>atlantica</i>	-10,44	0,78	-9,66	3	-9,76	3	-4,13	3	-0,04	2	11
<i>Cedrus</i>	<i>deodara</i>	-5,07	0,14	-4,93	3	-4,74	3	-2,00	3	-0,04	2	11
<i>Cedrus</i>	<i>libani</i>	-23,74	7,54	-16,20	3	-22,10	3	-9,56	3	-0,04	2	11
<i>Celtis</i>	<i>australis</i>	-5,08	0,10	-4,97	3	-3,79	3	-0,40	2	-0,04	2	10
<i>Celtis</i>	<i>occidentalis</i>	-4,76	0,10	-4,65	3	-3,52	2	-0,40	2	-0,04	2	9
<i>Cercis</i>	<i>siliquastrum</i>	-2,02	0,04	-1,98	2	-1,48	2	-0,17	1	-0,04	2	7
<i>Chamaecyparis</i>	<i>lawsoniana</i>	-0,74	0,02	-0,72	2	-0,69	1	-0,36	2	-0,05	3	8
<i>Chamaerops</i>	<i>humilis</i>	-1,59	5,76	+4,18	0	-1,43	2	-0,41	2	-0,02	0	4
<i>Cinnamomum</i>	<i>camphora</i>	-6,83	0,02	-6,81	3	-6,26	3	-0,69	2	-0,03	1	9
<i>Cistus</i>	<i>albidus</i>	-0,02	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Cistus</i>	<i>incanus</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Cistus</i>	<i>ladanifer</i>	-0,01	0,06	+0,05	0	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	0
<i>Cistus</i>	<i>salvifolius</i>	-0,01	0,01	-0,00	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Cordyline</i>	<i>indivisa</i>	-0,58	ND	ND	ND	-0,53	1	-0,07	1	-0,02	0	ND
<i>Cornus</i>	<i>alternifolia</i>	-0,54	0,00	-0,54	2	-0,39	1	-0,01	0	-0,02	1	4
<i>Cornus</i>	<i>controversa</i>	-0,55	ND	ND	ND	-0,40	1	-0,01	0	-0,02	1	ND
<i>Cornus</i>	<i>florida</i>	-0,53	0,00	-0,53	1	-0,39	1	-0,01	0	-0,02	1	3
<i>Cornus</i>	<i>mas</i>	-0,92	1,56	+0,64	0	-0,68	1	-0,02	1	-0,02	1	3
<i>Cornus</i>	<i>nuttallii</i>	-0,54	0,00	-0,54	2	-0,39	1	-0,01	0	-0,02	1	4

<i>Cotinus</i>	<i>coggygria</i>	-0,39	0,00	-0,39	1	-0,29	1	-0,01	0	-0,02	0	2
<i>Cupressus</i>	<i>arizonica</i>	-1,25	0,18	-1,08	2	-1,14	1	-0,64	2	-0,05	3	8
<i>Cupressus</i>	<i>macrocarpa</i>	-0,49	0,07	-0,42	1	-0,45	1	-0,24	2	-0,05	3	7
<i>Cupressus</i>	<i>sempervirens</i>	-0,60	0,02	-0,58	2	-0,56	1	-0,28	2	-0,05	3	8
<i>Cytisus</i>	<i>battandieri</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,04	2	3
<i>Cytisus</i>	<i>multiflorus</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,04	2	3
<i>Cytisus</i>	<i>praecox</i>	-0,02	0,00	-0,02	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,04	2	3
<i>Cytisus</i>	<i>scoparius</i>	-0,02	0,15	+0,14	0	-0,01	0	-0,00	0	-0,04	2	2
<i>Diospyros</i>	<i>kaki</i>	-0,39	0,01	-0,38	1	-0,29	1	-0,03	1	-0,02	0	3
<i>Erica</i>	<i>arborea</i>	-0,00	0,01	-0,00	0	-0,00	0	-0,00	0	-0,02	0	0
<i>Erica</i>	<i>multiflora</i>	-0,00	0,00	-0,00	0	-0,00	0	-0,00	0	-0,02	0	0
<i>Eriobotrya</i>	<i>japonica</i>	-2,67	0,07	-2,60	3	-2,42	2	-0,31	2	-0,03	1	8
<i>Eucalyptus</i>	<i>camaldulensis</i>	-4,67	23,49	+18,83	0	-4,34	3	-0,43	2	-0,11	3	8
<i>Eucalyptus</i>	<i>glaucescens</i>	-3,89	128,5 1	+124,62	0	-3,59	2	-0,37	2	-0,11	3	7
<i>Eucalyptus</i>	<i>globulus</i>	-17,43	428,9 3	+411,49	0	-16,04	3	-1,62	3	-0,11	3	9
<i>Eucalyptus</i>	<i>viminalis</i>	-4,72	5,55	+0,83	0	-4,36	3	-0,45	2	-0,11	3	8
<i>Fagus</i>	<i>sylvatica</i>	-25,88	1,12	-24,76	3	-19,37	3	-4,80	3	-0,10	3	12
<i>Ficus</i>	<i>carica</i>	-2,24	1,98	-0,27	1	-1,64	2	-0,19	1	-0,03	1	5
<i>Fraxinus</i>	<i>angustifolia</i>	-8,96	0,26	-8,69	3	-6,69	3	-0,20	2	-0,05	3	11
<i>Fraxinus</i>	<i>excelsior</i>	-26,05	0,00	-26,05	3	-19,45	3	-0,56	2	-0,05	3	11
<i>Fraxinus</i>	<i>ornus</i>	-1,49	0,10	-1,38	2	-1,10	1	-0,04	1	-0,05	3	7
<i>Fraxinus</i>	<i>pennsylvanica</i>	-5,43	0,00	-5,43	3	-4,06	3	-0,12	1	-0,05	3	10
<i>Fraxinus</i>	<i>uhdei</i>	-9,23	0,00	-9,23	3	-6,89	3	-0,20	2	-0,05	3	11
<i>Fraxinus</i>	<i>velutina</i>	-9,06	0,00	-9,06	3	-6,77	3	-0,20	2	-0,05	3	11
<i>Ginkgo</i>	<i>biloba</i>	-4,55	0,48	-4,07	3	-3,39	2	-0,58	2	-0,02	1	8
<i>Gleditsia</i>	<i>triacanthos</i>	-13,09	0,43	-12,66	3	-9,78	3	-0,89	3	-0,04	1	10
<i>Hibiscus</i>	<i>syriacus</i>	-0,04	0,00	-0,04	1	-0,03	0	-0,00	0	-0,02	0	1

<i>Hypericum</i>	<i>perforatum</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Ilex</i>	<i>cassine</i>	-0,46	0,00	-0,46	1	-0,42	1	-0,05	1	-0,02	0	3
<i>Ilex</i>	<i>cornuta</i>	-0,46	0,00	-0,46	1	-0,42	1	-0,05	1	-0,02	0	3
<i>Ilex</i>	<i>opaca</i>	-0,45	0,00	-0,45	1	-0,41	1	-0,05	1	-0,02	0	3
<i>Juglans</i>	<i>regia</i>	-8,24	1,29	-6,95	3	-6,12	3	-0,62	2	-0,05	3	11
<i>Juniperus</i>	<i>communis</i>	-0,03	0,00	-0,02	1	-0,02	0	-0,01	0	-0,05	3	4
<i>Lagestroemia</i>	<i>indaca</i>	-1,13	0,00	-1,13	2	-0,82	1	-0,03	1	-0,01	0	4
<i>Laurus</i>	<i>nobilis</i>	-4,76	0,61	-4,14	3	-4,34	3	-0,53	2	-0,03	1	9
<i>Lavandula</i>	<i>luisieri</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	1
<i>Lavandula</i>	<i>stoechas</i>	-0,01	0,01	-0,00	0	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	0	0
<i>Ligustrum</i>	<i>coriaceum</i>	-0,44	0,00	-0,44	1	-0,39	1	-0,01	0	-0,03	1	3
<i>Ligustrum</i>	<i>lucidum</i>	-0,44	0,00	-0,44	1	-0,39	1	-0,01	0	-0,03	1	3
<i>Ligustrum</i>	<i>vulgare</i>	-0,40	0,00	-0,40	1	-0,36	1	-0,01	0	-0,03	1	3
<i>Liquidambar</i>	<i>styraciflua</i>	-8,08	63,58	+55,50	0	-6,03	3	-0,57	2	-0,06	3	8
<i>Liriodendron</i>	<i>tulipifera</i>	-25,07	9,67	-15,39	3	-18,84	3	-1,79	3	-0,05	2	11
<i>Magnolia</i>	<i>grandiflora</i>	-7,61	9,01	+1,40	0	-7,00	3	-0,78	3	-0,02	1	7
<i>Magnolia</i>	<i>stellata</i>	-0,39	0,22	-0,17	1	-0,29	1	-0,04	1	-0,02	1	4
<i>Malus</i>	<i>communis</i>	-1,36	0,29	-1,07	2	-1,00	1	-0,09	1	-0,02	0	4
<i>Melia</i>	<i>azedarach</i>	-1,72	0,05	-1,67	2	-1,27	2	-0,14	1	-0,05	3	8
<i>Morus</i>	<i>alba</i>	-1,76	0,05	-1,71	2	-1,29	2	-0,14	1	-0,03	1	6
<i>Morus</i>	<i>nigra</i>	-1,78	0,05	-1,74	2	-1,31	2	-0,14	1	-0,03	1	6
<i>Morus</i>	<i>platanifolia</i>	-1,20	0,03	-1,16	2	-0,88	1	-0,10	1	-0,03	1	5
<i>Myrtus</i>	<i>communis</i>	-0,04	0,71	+0,68	0	-0,03	0	-0,00	0	-0,02	0	0
<i>Olea</i>	<i>europaea</i>	-1,38	0,12	-1,27	2	-1,25	1	-0,71	2	-0,01	0	5
<i>Ostrya</i>	<i>carpinifolia</i>	-6,58	0,00	-6,58	3	-4,90	3	-0,35	2	-0,06	3	11
<i>Parrotia</i>	<i>persica</i>	-3,74	1,33	-2,40	3	-2,75	2	-0,32	2	-0,05	3	10
<i>Paulownia</i>	<i>tomentosa</i>	-3,73	0,00	-3,73	3	-2,75	2	-0,32	2	-0,05	3	10
<i>Phillyrea</i>	<i>angustifolia</i>	-0,12	0,02	-0,10	1	-0,11	0	-0,01	0	-0,03	1	2

<i>Photinia</i>	<i>x.fraserii</i>	-0,76	0,00	-0,76	2	-0,69	1	-0,09	1	-0,02	1	5
<i>Picea</i>	<i>abies</i>	-13,47	1,24	-12,23	3	-12,56	3	-6,31	3	-0,04	2	11
<i>Picea</i>	<i>alcoquiana</i>	-1,52	0,00	-1,52	2	-1,40	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>asperata</i>	-1,61	0,00	-1,61	2	-1,48	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>aurantiaca</i>	-1,46	0,00	-1,46	2	-1,33	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>engelmannii</i>	-1,49	6,40	+4,91	0	-1,37	2	-0,77	3	-0,04	2	7
<i>Picea</i>	<i>glauca</i>	-0,21	0,42	+0,20	0	-0,19	0	-0,12	1	-0,04	2	3
<i>Picea</i>	<i>koyamai</i>	-1,52	0,00	-1,52	2	-1,40	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>likiangensis</i>	-1,63	0,00	-1,63	2	-1,51	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>mariana</i>	-0,23	0,73	+0,51	0	-0,21	1	-0,12	1	-0,04	2	4
<i>Picea</i>	<i>meyeri</i>	-1,52	0,00	-1,52	2	-1,40	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>montigena</i>	-0,21	0,00	-0,21	1	-0,19	0	-0,12	1	-0,04	2	4
<i>Picea</i>	<i>morrisonicola</i>	-1,63	0,00	-1,63	2	-1,51	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>omorika</i>	-1,53	3,63	+2,10	0	-1,41	2	-0,77	3	-0,04	2	7
<i>Picea</i>	<i>orientalis</i>	-1,58	0,00	-1,58	2	-1,46	2	-0,77	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>pungens</i>	-0,60	1,08	+0,48	0	-0,54	1	-0,33	2	-0,02	0	3
<i>Picea</i>	<i>rubens</i>	-2,39	0,61	-1,77	2	-2,21	2	-1,19	3	-0,04	2	9
<i>Picea</i>	<i>sitchensis</i>	-2,44	4,02	+1,59	0	-2,25	2	-1,18	3	-0,04	2	7
<i>Picea</i>	<i>smithiana</i>	-2,30	0,00	-2,30	3	-2,12	2	-1,13	3	-0,04	2	10
<i>Pinus</i>	<i>canariensis</i>	-3,06	0,93	-2,12	2	-2,81	2	-1,80	3	-0,09	3	10
<i>Pinus</i>	<i>clausa</i>	-3,09	5,00	+1,91	0	-2,84	2	-1,80	3	-0,04	2	7
<i>Pinus</i>	<i>contorta</i>	-3,12	1,17	-1,95	2	-2,86	2	-1,80	3	-0,02	1	8
<i>Pinus</i>	<i>densiflora</i>	-3,03	0,07	-2,96	3	-2,79	2	-1,80	3	-0,04	2	10
<i>Pinus</i>	<i>elliottii</i>	-3,09	2,20	-0,89	2	-2,84	2	-1,80	3	-0,05	3	10
<i>Pinus</i>	<i>halepensis</i>	-1,37	0,27	-1,10	2	-1,26	2	-0,80	3	-0,04	2	9
<i>Pinus</i>	<i>nigra</i>	-3,23	1,50	-1,74	2	-3,00	2	-1,80	3	-0,03	1	8
<i>Pinus</i>	<i>palustris</i>	-3,21	2,56	-0,64	2	-2,93	2	-1,80	3	-0,04	2	9
<i>Pinus</i>	<i>pinaster</i>	-3,11	9,11	+6,00	0	-2,86	2	-1,80	3	-0,04	2	7

<i>Pinus</i>	<i>pinea</i>	-4,32	9,15	+4,83	0	-3,98	3	-2,46	3	-0,04	2	8
<i>Pinus</i>	<i>ponderosa</i>	-3,08	0,46	-2,62	3	-2,83	2	-1,80	3	-0,02	1	9
<i>Pinus</i>	<i>radiata</i>	-3,08	0,30	-2,78	3	-2,83	2	-1,80	3	-0,06	3	11
<i>Pinus</i>	<i>resinosa</i>	-3,02	0,03	-2,98	3	-2,78	2	-1,80	3	-0,04	2	10
<i>Pinus</i>	<i>sabiniana</i>	-3,09	0,28	-2,81	3	-2,84	2	-1,80	3	-0,04	2	10
<i>Pinus</i>	<i>sibirica</i>	-3,09	1,17	-1,92	2	-2,84	2	-1,80	3	-0,04	2	9
<i>Pinus</i>	<i>strobus</i>	-3,15	1,17	-1,98	2	-2,91	2	-1,80	3	-0,04	2	9
<i>Pinus</i>	<i>sylvestris</i>	-3,09	4,05	+0,96	0	-2,84	2	-1,80	3	-0,01	0	5
<i>Pinus</i>	<i>taeda</i>	-3,08	2,22	-0,86	2	-2,83	2	-1,80	3	-0,06	3	10
<i>Pistacia</i>	<i>chinensis</i>	-0,86	0,98	+0,12	0	-0,63	1	-0,07	1	-0,02	0	2
<i>Pittosporum</i>	<i>phillyraeoides</i>	-0,05	0,00	-0,05	1	-0,04	0	-0,01	0	-0,02	0	1
<i>Pittosporum</i>	<i>tobira</i>	-0,08	0,00	-0,08	1	-0,07	0	-0,01	0	-0,02	0	1
<i>Pittosporum</i>	<i>undulatum</i>	-0,08	0,00	-0,08	1	-0,07	0	-0,01	0	-0,02	0	1
<i>Platanus</i>	<i>x acerifolia</i>	-22,10	15,37	-6,73	3	-16,67	3	-1,58	3	-0,04	2	11
<i>Populus</i>	<i>alba</i>	-10,18	48,20	+38,02	0	-7,62	3	-0,70	2	-0,04	2	7
<i>Populus</i>	<i>nigra</i>	-10,27	125,7 3	+115,46	0	-7,68	3	-0,70	2	-0,04	2	7
<i>Populus</i>	<i>tremula</i>	-1,97	19,63	+17,66	0	-1,46	2	-0,15	1	-0,04	2	5
<i>Prunus</i>	<i>avium</i>	-0,16	0,00	-0,16	1	-0,12	0	-0,01	0	-0,02	1	2
<i>Prunus</i>	<i>cerasifera</i>	-0,86	0,00	-0,86	2	0,63	1	-0,07	1	-0,01	0	4
<i>Prunus</i>	<i>domestica</i>	-0,90	0,00	-0,90	2	-0,66	1	-0,07	1	-0,02	1	5
<i>Prunus</i>	<i>dulcis</i>	-1,86	0,01	-1,85	2	-1,35	2	-0,16	1	-0,02	1	6
<i>Prunus</i>	<i>laurocerasus</i>	-1,78	0,00	-1,78	2	-1,61	2	-0,21	2	-0,02	1	7
<i>Prunus</i>	<i>persica</i>	-0,16	0,02	-0,14	1	-0,11	0	-0,01	0	-0,02	1	2
<i>Prunus</i>	<i>serotina</i>	-0,16	0,00	-0,16	1	-0,12	0	-0,01	0	-0,02	1	2
<i>Prunus</i>	<i>serrulata</i>	-0,15	0,00	-0,15	1	-0,11	0	-0,01	0	-0,03	1	2
<i>Prunus</i>	<i>spinosa</i>	-0,15	0,00	-0,15	1	-0,11	0	-0,01	0	-0,02	1	2
<i>Prunus</i>	<i>virginiana</i>	-0,16	0,00	-0,16	1	-0,11	0	-0,01	0	-0,02	1	2

<i>Pseudotsuga</i>	<i>menziesii</i>	-33,43	25,18	-8,24	3	-31,31	3	-12,63	3	-0,06	3	12
<i>Punica</i>	<i>granatum</i>	-1,11	0,00	-1,11	2	-0,81	1	-0,10	1	-0,02	0	4
<i>Pyracantha</i>	<i>coccinea</i>	-0,10	0,00	-0,10	1	-0,09	0	-0,01	0	-0,02	1	2
<i>Pyrus</i>	<i>calleryana</i>	-1,25	0,00	-1,25	2	-0,92	1	-0,10	1	-0,03	1	5
<i>Pyrus</i>	<i>communis</i>	-1,22	0,15	-1,07	2	-0,90	1	-0,10	1	-0,01	0	4
<i>Pyrus</i>	<i>coronaria</i>	-1,24	0,00	-1,24	2	-0,91	1	-0,10	1	-0,03	1	5
<i>Pyrus</i>	<i>kawakamii</i>	-1,24	0,00	-1,24	2	-0,91	1	-0,10	1	-0,03	1	5
<i>Pyrus</i>	<i>malus</i>	-1,24	0,00	-1,24	2	0,91	1	-0,10	1	-0,03	1	5
<i>Quercus</i>	<i>cerris</i>	-12,50	4,13	-8,37	3	-9,36	3	-1,56	3	-0,08	3	12
<i>Quercus</i>	<i>coccinea</i>	-9,31	243,1 0	+233,79	0	-6,80	3	-1,46	3	-0,08	3	9
<i>Quercus</i>	<i>douglasii</i>	-15,31	36,27	+20,96	0	-11,38	3	-1,99	3	-0,08	3	9
<i>Quercus</i>	<i>frainetto</i>	-5,13	184,3 7	+179,24	0	-3,84	3	-0,63	2	-0,08	3	8
<i>Quercus</i>	<i>ilex</i>	-19,02	103,5 3	+84,51	0	-17,61	3	-3,13	3	-0,05	3	9
<i>Quercus</i>	<i>palustris</i>	-11,60	7,67	-3,93	3	-8,66	3	-1,46	3	-0,11	3	12
<i>Quercus</i>	<i>petraea</i>	-18,41	85,89	+67,49	0	-13,88	3	-2,16	3	-0,08	3	9
<i>Quercus</i>	<i>pubescens</i>	-2,73	50,99	+48,26	0	-2,03	2	-0,36	2	-0,08	3	7
<i>Quercus</i>	<i>robur</i>	-13,79	138,5 8	+124,79	0	-10,36	3	-1,65	3	-0,08	3	9
<i>Quercus</i>	<i>rotundifolia</i>	-16,42	25,87	+9,45	0	-15,16	3	-2,73	3	-0,08	3	9
<i>Quercus</i>	<i>rubra</i>	-17,24	17,27	+0,04	0	-12,88	3	-2,17	3	-0,07	3	9
<i>Quercus</i>	<i>suber</i>	-11,11	79,14	+68,03	0	-10,18	3	-1,90	3	-0,08	3	9
<i>Quercus</i>	<i>turneri</i>	-1,33	ND	ND	ND	-0,98	1	-0,20	2	-0,08	3	ND
<i>Rhamnus</i>	<i>alaternus</i>	-1,03	3,51	+2,48	0	-0,92	1	-0,12	1	-0,02	0	2
<i>Rhus</i>	<i>typhina</i>	-2,37	0,00	-2,37	3	-2,14	2	-0,27	2	-0,02	0	7
<i>Robinia</i>	<i>pseudoacacia</i>	-5,61	12,25	+6,64	0	-4,19	3	-0,42	2	-0,04	2	7
<i>Rosmarinus</i>	<i>officinalis</i>	-0,02	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,01	0	-0,02	0	1
<i>Rubus</i>	<i>fruticosus</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	1	2
<i>Rubus</i>	<i>ideaus</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	1	2

<i>Rubus</i>	<i>occidentalis</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	1	2
<i>Rubus</i>	<i>parviflorus</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	1	2
<i>Rubus</i>	<i>ulmifolius</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	1	2
<i>Rubus</i>	<i>ursinus</i>	-0,01	0,00	-0,01	1	-0,01	0	-0,00	0	-0,02	1	2
<i>Ruscus</i>	<i>aculeatus</i>	-0,00	ND	ND	ND	-0,00	0	-0,00	0	-0,02	0	ND
<i>Salix</i>	<i>alba</i>	-0,84	7,35	+6,51	0	-0,63	1	-0,06	1	-0,04	2	4
<i>Salix</i>	<i>amygdaloides</i>	-0,26	0,97	+0,71	0	-0,19	1	-0,02	1	-0,04	2	4
<i>Salix</i>	<i>atrocineria</i>	-0,60	3,15	+2,55	0	-0,44	1	-0,05	1	-0,04	2	4
<i>Salix</i>	<i>babylonica</i>	-0,60	17,37	+16,78	0	-0,44	1	-0,05	1	-0,04	2	4
<i>Salix</i>	<i>discolor</i>	-0,06	0,42	+0,36	0	-0,04	0	-0,01	0	-0,04	2	2
<i>Salix</i>	<i>interior</i>	-0,06	0,42	+0,37	0	-0,04	0	-0,01	0	-0,04	2	2
<i>Salix</i>	<i>lasianдра</i>	-0,25	0,97	+0,72	0	-0,18	0	-0,02	1	-0,04	2	3
<i>Salix</i>	<i>lasiolepis</i>	-0,26	0,97	+0,71	0	-0,19	0	-0,02	1	-0,04	2	3
<i>Salix</i>	<i>lutea</i>	-0,06	0,42	+0,36	0	-0,04	0	-0,01	0	-0,04	2	2
<i>Salix</i>	<i>matsudana</i>	-0,58	3,85	+3,27	0	-0,43	1	-0,05	1	-0,04	2	4
<i>Salix</i>	<i>scouleriana</i>	-0,06	0,24	+0,18	0	-0,05	0	-0,01	0	-0,04	2	2
<i>Sambucus</i>	<i>canadensis</i>	-1,10	0,00	-1,10	2	-0,80	1	-0,03	1	-0,02	0	4
<i>Sambucus</i>	<i>nigra</i>	-1,10	0,00	-1,10	2	-0,81	1	-0,03	1	-0,02	0	4
<i>Sambucus</i>	<i>simpsonii</i>	-1,10	0,00	-1,10	2	-0,80	1	-0,03	1	-0,02	0	4
<i>Sophora</i>	<i>japonica</i>	-9,21	2,56	-6,65	3	-6,84	3	-0,72	2	-0,04	2	10
<i>Sorbus</i>	<i>americana</i>	-1,18	0,00	-1,18	2	-0,87	1	-0,10	1	-0,02	1	5
<i>Sorbus</i>	<i>aria</i>	-1,16	0,00	-1,16	2	-0,86	1	-0,10	1	-0,02	1	5
<i>Sorbus</i>	<i>aucuparia</i>	-1,18	0,00	-1,18	2	-0,87	1	-0,10	1	-0,02	1	5
<i>Sorbus</i>	<i>domestica</i>	-1,17	ND	ND	ND	-0,86	1	-0,10	1	-0,02	1	ND
<i>Taxus</i>	<i>baccata</i>	-4,00	0,67	-3,33	3	-3,67	2	-1,65	3	-0,05	3	11
<i>Teucrium</i>	<i>fruticans</i>	-0,02	ND	ND	ND	-0,02	0	-0,00	0	-0,02	0	ND
<i>Tilia</i>	<i>cordata</i>	-22,48	0,00	-22,48	3	-16,76	3	-1,72	3	-0,07	3	12
<i>Tilia</i>	<i>platyphyllos</i>	-23,42	0,00	-23,42	3	-17,61	3	-1,72	3	-0,07	3	12

<i>Tilia</i>	<i>x europaea</i>	-17,35	0,00	-17,35	3	-13,04	3	-1,26	3	-0,07	3	12
<i>Ulmus</i>	<i>americana</i>	-12,00	0,00	-12,00	3	-8,98	3	-0,89	3	-0,05	2	11
<i>Ulmus</i>	<i>minor</i>	-5,28	0,11	-5,17	3	-3,95	3	-0,40	2	-0,04	2	10
<i>Ulmus</i>	<i>parviflora</i>	-12,10	0,00	-12,10	3	-9,06	3	-0,89	3	-0,03	1	10
<i>Viburnum</i>	<i>tinus</i>	-0,15	0,00	-0,15	1	-0,13	0	-0,02	1	-0,02	0	2
<i>Zelkova</i>	<i>serrata</i>	-6,30	0,00	-6,30	3	-4,71	3	-0,45	2	-0,07	3	11

Annexe 3 - Capacité d'élimination des principaux polluants de l'air d'espèces végétales présentes à Bucharest – Ozone (g O₃ arbre⁻¹ jour⁻¹), dioxyde d'azote (g NO₂ arbre⁻¹ jour⁻¹), particules (g PM₁₀ arbre⁻¹ jour⁻¹), et leur potentiel de formation d'ozone (PFO).

Espèce	O ₃ absorption	PFO	Bilan O ₃	NO ₂ absorption	PM ₁₀ dépôt
<i>Abies alba</i>	- 2,28	0,74	- 1,54	- 1,31	- 1,80
<i>Acer campestre</i>	- 1,21	0,05	- 1,17	- 0,42	- 0,33
<i>Acer negundo</i>	- 2,82	0,30	- 2,52	- 0,98	- 0,71
<i>Acer platanoides</i>	- 7,39	0,07	- 7,31	- 2,64	- 1,79
<i>Acer pseudoplatanus</i>	- 7,49	0,76	- 6,74	- 2,66	- 1,79
<i>Aesculus hippocastanum</i>	- 5,47	0,00	- 5,47	- 1,95	- 0,27
<i>Ailanthus altissima</i>	- 1,79	0,00	- 1,79	- 0,62	- 0,28
<i>Alnus glutinosa</i>	- 2,14	2,06	- 0,07	- 0,74	- 0,37
<i>Betula pendula</i>	- 0,85	0,32	- 0,53	- 0,30	- 0,29
<i>Buxus sempervirens</i>	- 0,11	0,67	+ 0,56	- 0,06	- 0,03
<i>Carpinus betulus</i>	- 3,18	0,01	- 3,17	- 1,11	- 0,51
<i>Catalpa bignonioides</i>	- 2,10	0,52	- 1,58	- 0,71	- 0,34
<i>Cedrus atlantica</i>	- 4,92	0,55	- 4,37	- 2,84	- 3,54
<i>Cedrus deodara</i>	- 2,39	0,10	- 2,29	- 1,38	- 1,71
<i>Celtis australis</i>	- 2,09	0,07	- 2,02	- 0,74	- 0,34
<i>Celtis occidentalis</i>	- 1,94	0,07	- 1,86	- 0,68	- 0,34
<i>Cercis siliquastrum</i>	- 0,81	0,03	- 0,78	- 0,28	- 0,14
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	- 0,35	0,02	- 0,33	- 0,20	- 0,30
<i>Cistus salviifolius</i>	- 0,01	0,01	0,00	- 0,00	- 0,00
<i>Cornus mas</i>	- 0,37	1,15	+ 0,78	- 0,13	- 0,02
<i>Cotinus coggygria</i>	- 0,16	0,00	- 0,16	- 0,05	- 0,01
<i>Cupressus sempervirens</i>	- 0,28	0,02	- 0,26	- 0,16	- 0,24
<i>Diospyros kaki</i>	- 0,16	0,01	- 0,15	- 0,05	- 0,03
<i>Fagus sylvatica</i>	- 10,66	0,82	- 9,84	- 3,75	- 4,09
<i>Ficus carica</i>	- 0,90	1,44	+ 0,55	- 0,31	- 0,17

<i>Fraxinus angustifolia</i>	- 3,68	0,19	- 3,49	- 1,29	- 0,18
<i>Fraxinus excelsior</i>	- 10,60	0,00	- 10,60	- 3,67	- 0,50
<i>Fraxinus ornus</i>	- 0,60	0,08	- 0,53	- 0,21	- 0,03
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	- 2,23	0,00	- 2,23	- 0,78	- 0,11
<i>Ginkgo biloba</i>	- 1,88	0,35	- 1,52	- 0,67	- 0,49
<i>Gleditsia triacanthos</i>	- 5,30	0,31	- 4,99	- 1,82	- 0,77
<i>Hibiscus syriacus</i>	- 0,02	0,00	- 0,02	- 0,01	- 0,00
<i>Ilex aquifolium</i>	- 0,21	0,00	- 0,21	- 0,11	- 0,05
<i>Juglans regia</i>	- 3,33	0,95	- 2,38	- 1,15	- 0,53
<i>Juniperus horizontalis</i>	- 0,01	0,00	- 0,01	- 0,01	- 0,00
<i>Lagerstroemia indica</i>	- 0,45	0,00	- 0,45	- 0,15	- 0,03
<i>Laurus nobilis</i>	- 2,20	0,43	- 1,76	- 1,23	- 0,49
<i>Ligustrum ovalifolium</i>	- 0,20	0,00	- 0,20	- 0,11	- 0,01
<i>Liriodendron tulipifera</i>	- 10,38	7,03	- 3,35	- 3,68	- 1,54
<i>Magnolia grandiflora</i>	- 3,52	6,37	+ 2,85	- 1,99	- 0,72
<i>Malus domestica</i>	- 0,55	0,21	- 0,34	- 0,19	- 0,07
<i>Morus alba</i>	- 0,70	0,03	- 0,67	- 0,24	- 0,12
<i>Morus nigra</i>	- 0,71	0,03	- 0,68	- 0,24	- 0,12
<i>Paulownia tomentosa</i>	- 1,51	0,00	- 1,51	- 0,53	- 0,28
<i>Photinia x fraseri</i>	- 0,35	0,00	- 0,34	- 0,19	- 0,08
<i>Picea abies</i>	- 6,33	0,88	- 5,45	- 3,64	- 5,53
<i>Picea pungens</i>	- 0,27	0,77	+ 0,49	- 0,15	- 0,29
<i>Pinus canariensis</i>	- 1,42	0,66	- 0,75	- 0,80	- 1,52
<i>Pinus nigra</i>	- 1,51	1,06	- 0,45	- 0,86	- 1,52
<i>Pinus strobus</i>	- 1,46	0,83	- 0,63	- 0,82	- 1,52
<i>Pinus sylvestris</i>	- 1,42	2,86	+ 1,44	- 0,80	- 1,52
<i>Pinus taeda</i>	- 1,42	1,57	+ 0,15	- 0,80	- 1,52
<i>Platanus x acerifolia</i>	- 9,25	11,18	+ 1,93	- 3,32	- 1,36

<i>Populus alba</i>	- 4,14	35,07	+ 30,93	- 1,43	- 0,61
<i>Populus nigra</i>	- 4,17	91,43	+ 87,27	- 1,43	- 0,61
<i>Prunus avium</i>	- 0,06	0,00	- 0,06	- 0,02	- 0,01
<i>Prunus cerasifera</i>	- 0,35	0,00	- 0,34	- 0,12	- 0,06
<i>Prunus domestica</i>	- 0,36	0,00	- 0,36	- 0,12	- 0,06
<i>Prunus laurocerasus</i>	- 0,82	0,00	- 0,82	- 0,45	- 0,19
<i>Prunus persica</i>	- 0,06	0,01	- 0,05	- 0,02	- 0,01
<i>Prunus serrulata</i>	- 0,06	0,00	- 0,06	- 0,02	- 0,01
<i>Prunus spinosa</i>	- 0,06	0,00	- 0,06	- 0,02	- 0,01
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	- 15,84	17,82	+ 1,98	- 9,18	- 11,17
<i>Punica granatum</i>	- 0,44	0,00	- 0,44	- 0,15	- 0,09
<i>Pyracantha coccinea</i>	- 0,05	0,00	- 0,05	- 0,03	- 0,01
<i>Pyrus calleryana</i>	- 0,50	0,00	- 0,50	- 0,17	- 0,09
<i>Pyrus communis</i>	- 0,49	0,11	- 0,39	- 0,17	- 0,09
<i>Quercus cerris</i>	- 5,15	3,04	- 2,11	- 1,81	- 1,34
<i>Quercus pubescens</i>	- 1,11	37,08	+ 35,97	- 0,39	- 0,31
<i>Quercus robur</i>	- 5,69	100,80	+ 95,11	- 2,00	- 1,41
<i>Quercus rubra</i>	- 7,07	12,57	+ 5,51	- 2,48	- 1,86
<i>Rhus typhina</i>	- 1,07	0,00	- 1,07	- 0,59	- 0,24
<i>Robinia pseudoacacia</i>	- 2,31	8,93	+ 6,62	- 0,81	- 0,36
<i>Rubus idaeus</i>	- 0,00	0,00	- 0,00	- 0,00	- 0,00
<i>Salix alba</i>	- 0,34	5,34	+ 5,00	- 0,12	- 0,05
<i>Salix babylonica</i>	- 0,24	12,63	+ 12,39	- 0,08	- 0,04
<i>Sambucus nigra</i>	- 0,44	0,00	- 0,44	- 0,15	- 0,03
<i>Styphnolobium japonicum</i>	- 3,76	1,86	- 1,90	- 1,32	- 0,62
<i>Taxus baccata</i>	- 1,86	0,48	- 1,39	- 1,05	- 1,47
<i>Tilia cordata</i>	- 9,22	0,00	- 9,22	- 3,24	- 1,48
<i>Tilia platyphyllos</i>	- 9,76	0,00	- 9,76	- 3,49	- 1,48

<i>Tilia x europaea</i>	- 7,21	0,00	- 7,21	- 2,57	- 1,09
<i>Ulmus minor</i>	- 2,18	0,08	- 2,11	- 0,78	- 0,34
<i>Ulmus parvifolia</i>	- 4,99	0,00	- 4,99	- 1,76	- 0,77

Annexe 4 - Liste des principales espèces végétales avec leur efficacité en termes d'amélioration de la qualité de l'air (ozone O₃, dioxyde d'azote NO₂, particules PM₁₀, séquestration du dioxyde de carbone CO₂, stockage de carbone), de résilience face au changement climatique, d'atténuation des îlots de chaleur urbains, d'intérêt pour la biodiversité en termes d'attractivité des oiseaux et des insectes pollinisateurs et des caractéristiques de l'arbre (croissance, système racinaire, hauteur, potentiel allergisant des pollens faible, modéré, élevé, origine): pas ou peu efficace (rouge), modérément efficace (orange), efficace (vert) et neutre (blanc). Liste des principales espèces végétales avec leur conditions environnementales (exposition, tolérance à la sécheresse, chaleur, gel, sols humides, sel et pH) et entretien (tolérance aux maladies et ravageurs, maintenance, en particulier l'élagage) : pas ou peu tolérant (rouge), modérément tolérant (orange) et tolérant (vert). Rusticité (tolérance au gel) : très rustique au-delà de - 15°C (vert), jusqu'à - 15°C (orange) et pas au-dessous de -5°C (rouge).

Espèce	Nom commun	Capacité d'élimination					Résilience au changement climatique	Atténuation des îlots de chaleur urbain	Biodiversité	Caractéristiques de l'arbre					Conditions environnementales					Entretien					
		O3	NO2	PM10	CO2	Stock carbone				Nourriture pour oiseaux	Pollinisateurs	Croissance	Racines déformantes	Hauteur (m)	Hauteur moyenne (m)	Pollens allergisants	Origine	Exposition	Tolérance à la sécheresse	Tolérance à la chaleur	Tolérance au gel	Tolérance aux sols humides	Tolérance au sel	pH	Tolérance aux maladies et ravageurs
Acer campestre	Érable champêtre									Lente	non	10-15	13		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, mi-ombre							5.5-6.0		
Acer manspessulanum	Érable de Montpellier									Lente	oui	<10	7		Europe, Asie de l'Ouest, Afrique du Nord	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Acer platanoides	Érable plane									Moyenne	non	>20	25		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, mi-ombre							4.8-6.2		
Acer pseudoplatanus	Érable sycomore									Rapide	non	>20	25		Europe centrale	Soleil, mi-ombre							5.5-8.2		
Acer rubrum	Érable rouge									Rapide	oui	>20	30		Amérique du Nord	Soleil, mi-ombre							4.7-7.3		
Acer saccharinum	Érable argenté									Rapide	oui	>20	25		Amérique du Nord	Soleil, mi-ombre							4.0-7.3		
Acer x freemanii	Érable de Freeman									Moyenne	non	15-20	18		Amérique du Nord	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Aesculus hippocastanum	Maronnier d'Inde									Moyenne	non	>20	25		Chine	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Aesculus x carnea	Maronnier à fleurs rouges									Lente	oui	15-20	18		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, mi-ombre							5.5-8.2		
Alnus glutinosa	Aulne glutineux									Moyenne	oui	15-20	18		Europe, Asie de l'Ouest, Afrique du Nord	Soleil, mi-ombre							4.4-7.3		
Brachychiton populneus	Kurtajong									Rapide	non	10-20	15		Australie	Soleil							5.5-6.5		
Carpinus betulus	Charme commun									Lente	non	15-20	18		Europe	Soleil, Ombré							5.0-8.0		
Castanea sativa	Châtaignier commun									Rapide	non	>20	20		Europe, Asie de l'Ouest, Afrique du Nord	Soleil, Ombré							4.0-7.5		
Casuarina cunninghamiana	Pin australien									Rapide	non	15-35	18		Australie	Soleil							5.5-7.0		
Cedrus atlantica	Cèdre de l'Atlas									Lente	non	>20	35		Afrique du Nord	Soleil							5.5-8.2		
Cedrus libani	Cèdre du Liban									Lente	non	10-15	12		Europe	Soleil							5.5-8.2		
Celtis australis	Micocoulier de Provence									Rapide	non	15-20	15		Bassin méditerranéen, Afrique du Nord	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Celtis occidentalis	Micocoulier occidental									Rapide	non	15-20	15		Amérique du Nord	Soleil, mi-ombre							4.5-8.2		
Celtis sinensis	Micocoulier de Chine									Moyenne	oui	15-20	15		Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Chitalpa tashkentensis	Chitalpa de Tashkent									Moyenne	non	<10	8		Asie	Soleil							5.0-8.0		
Cinnamomum camphora	Camphrier									Rapide	oui	10-20	12		Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							4.8-8.0		
Corylus avellana	Noisetier commun									Moyenne	non	<10	4		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, Ombré							5.5-8.0		
Corylus colurna	Noisetier de Byzance									Lente	oui	>20	15		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, Ombré							5.5-8.0		
Crataegus laevigata	Aubépine lisse									Lente	non	<10	6		Europe, Afrique du Nord	Soleil, Ombré							5.5-8.0		
Fagus sylvatica	Hêtre commun									Moyenne	oui	>20	28		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, Ombré							5.0-7.5		
Firmiana simplex	Parasol chinois									Rapide	oui	10-15	11		Asie du Sud, Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.0-8.0		
Fraxinus angustifolia	Frêne à feuilles étroites									Moyenne	oui	15-20	18		Europe	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Fraxinus excelsior	Frêne commun									Moyenne	oui	>20	35		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, Ombré							5.5-7.5		
Fraxinus ornus	Frêne à fleurs									Lente	non	10-15	12		Europe	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Ginkgo biloba (mâle)	Ginkgo									Lente	non	>20	35		Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.0-8.0		
Gleditsia triacanthos 'Sunburst'	Févier d'Amérique doré									Moyenne	non	10-15	10		Amérique du Nord	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Jacaranda mimosifolia	Flamboyant bleu									Rapide	non	10-15	10		Amérique du Sud	Soleil							5.5-8.0		
Koeleruteria paniculata	Savonnier									Lente	non	10-15	10		Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.0-8.2		
Lagerstroemia indica	Lilas d'été									Rapide	non	<10	6		Asie du Sud, Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.0-8.0		
Liquidambar styraciflua	Copaine d'Amérique									Lente	oui	>20	20		Amérique du Nord	Soleil, Ombré							4.0-8.0		
Liriodendron tulipifera	Tulipier de Virginie									Rapide	oui	>20	30		Amérique du Nord	Soleil, Ombré							5.0-7.5		
Magnolia grandiflora	Magnolia à grandes fleurs									Rapide	oui	15-20	15		Amérique du Nord	Soleil, Ombré							4.5-7.0		
Melia azedarach	Lilas de Perse									Rapide	non	7-15	10		Asie du Sud, Australie	Soleil							5.0-7.0		
Morus alba 'Fruitless'	Mûrier blanc stérile									Moyenne	oui	10-15	12		Asie de l'Est	Soleil							5.0-7.5		
Pinus densiflora	Pin rouge du Japon									Moyenne	non	10-20	15		Nord Est Chine	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Pinus nigra	Pin noir									Moyenne	oui	>20	35		Europe	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Pinus pinaster	Pin pinon									Moyenne	oui	10-20	15		Europe du Sud Ouest	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Pistacia chinensis	Pistachier de Chine									Moyenne	non	<10	8		Asie de l'Est	Soleil, Ombré							5.5-8.0		
Platanus orientalis	Platane d'Orient									Moyenne	oui	>20	25		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil							5.5-8.0		
Platanus x acerifolia	Platane commun									Moyenne	oui	>20	25		Asie de l'Ouest, Amérique du Nord	Soleil							5.5-8.0		
Prunus avium	Merisier									Moyenne	non	15-20	17		Europe, Asie de l'Ouest, Afrique du Nord	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Pterocarya fraxinifolia	Ptérocaryer du Caucase									Moyenne	oui	>20	22		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, Ombré							5.0-6.0		
Pyrus calleryana	Poirier de Chine									Rapide	oui	10-15	10		Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.0-8.0		
Quercus acutissima	Chêne du Japon									Moyenne	oui	10-15	12		Asie de l'Est	Soleil							5.0-6.0		
Quercus cerris	Chêne chevelu									Moyenne	oui	>20	25		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil							5.0-7.5		
Quercus palustris	Chêne des marais									Moyenne	oui	>20	25		Amérique du Nord	Soleil, mi-ombre							4.5-6.5		
Quercus petraea Lieblein	Chêne sessile									Moyenne	oui	>20	25		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, Ombré							5.5-8.0		
Salix caprea	Saule marsault									Moyenne	oui	<10	7		Europe, Asie de l'Ouest et de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.0-7.5		
Schinus molle	Faux-poivrier odorant									Rapide	oui	10-15	12		Amérique du Sud	Soleil							5.0-7.5		
Sophora japonica	Sophora du Japon									Moyenne	non	15-20	17		Asie de l'Est, Chine	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Tamarix gallica	Tamaris commun									Moyenne	non	<5	4		Asie de l'Ouest et de l'Est	Soleil							5.5-8.0		
Tilia americana	Tilleul américain									Moyenne	non	>20	27		Amérique du Nord	Soleil, Ombré							4.5-7.5		
Tilia cordata	Tilleul à petites feuilles									Moyenne	oui	>20	32		Europe	Soleil, Ombré							4.5-7.5		
Tilia platyphyllos	Tilleul à grandes feuilles									Moyenne	oui	>20	32		Europe	Soleil, Ombré							5.5-7.5		
Tilia x europaea	Tilleul commun									Moyenne	oui	>20	27		Europe	Soleil, Ombré							5.5-7.5		
Tilia tomentosa	Tilleul argenté									Moyenne	oui	>20	27		Asie de l'Ouest et de l'Est	Soleil, Ombré							4.5-7.5		
Tipuana tipu	Tipuana tipu									Rapide	oui	15-20	18		Amérique du Sud	Soleil							6.5-7.5		
Ulmus americana	Orme d'Amérique									Rapide	oui	>20	32		Amérique du Nord	Soleil, Ombré							6.5-8.0		
Ulmus 'Columella'	Orme 'Columella'									Rapide	oui	10-15	12		Pays-Bas	Soleil, Ombré							5.5-7.5		
Ulmus glabra Huds.	Orme des montagnes									Moyenne	oui	>20	35		Europe, Asie de l'Ouest	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		
Ulmus 'Sapporo Autumn Gold'	Orme Résistant Sapporo Gold									Rapide	oui	10-15	12		Japon	Soleil							6.0-8.0		
Ulmus minor Mill.	Orme champêtre									Rapide	oui	>20	32		Europe	Soleil, mi-ombre							5.5-8.0		
Zelkova serrata	Zelkova du Japon									Moyenne	oui	>20	20		Asie de l'Est	Soleil, mi-ombre							5.5-7.5		